

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Antonio Šojat**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Dr. sc. Željko Alar, izv. prof

Student:

Antonio Šojat

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Prvenstveno se zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Željku Alaru na pomoći i savjetima prilikom izrade završnog rada. Zahvaljujem se tehničarima Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Romanu Divjaku i Ivanu Martinku radi pomoći prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela rada. Također, zahvaljujem se obitelji i djevojci na podršci tijekom studiranja.

Antonio Šojat



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Šojat**

Mat. br.: **0035207417**

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku: Statičko vlačno ispitivanje pri sniženim temperaturama

Naslov rada na  
engleskom jeziku: Tensile testing at low temperature

Opis zadatka:

U eksploataciji materijali su često izloženi sniženim temperaturama i njihovo ponašanje u takvim uvjetima se znatno mijenja u odnosu na sobnu temperaturu. Statičko vlačno ispitivanje metalnih materijala pri sniženoj temperaturi je definirano novim izdanjima normi HRN EN ISO 6892-3:2015 i HRN EN ISO 6892-4:2015.

U radu je potrebno:

- opisati metodu ispitivanja pri sniženim temperaturama
- dati pregled zahtjeva na opremu za ova ispitivanja
- prema literaturnim izvorima odrediti utjecajne faktore na rezultate ispitivanja
- eksperimentalno provesti ispitivanje čelika na sniženoj temperaturi
- analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.

3. rok: 20. rujna 2019.


Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.

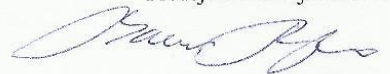
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.

3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

  
Izv.prof. dr. sc. Željko Alar

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O STATIČKOM VLAČNOM ISPITIVANJU.....	3
2.1. Određivanje mehaničkih svojstava statičkim vlačnim ispitivanjem.....	3
2.2. Oprema.....	5
2.2.1. Kidalica.....	5
2.2.2. Ekstenzometri.....	7
2.2.2.1. Vrste kontaktnih ekstenzometara.....	8
2.2.2.2. Vrste bezkontaktnih ekstenzometara.....	9
2.3. Ispitni uzorak (eproveta).....	11
3. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE PRI SNIŽENIM TEMPERATURAMA.....	14
3.1. Općenito.....	14
3.1.1. Ekstenzometar za snižene temperature.....	14
3.2. Ohlađivanje epruvete.....	16
3.2.1. Općenita podjela.....	16
3.2.2. Zahtjevi i ovjeravanje mjernih uređaja za temperaturu.....	16
3.2.2.1. Dopuštena odstupanja prilikom mjerenja temperature.....	17
3.2.3. Hlađenje pomoću komora za ohlađivanje i ekspanzije stlačenih plinova.....	17
3.2.4. Hlađenje pomoću tekućeg helija i tekućeg dušika.....	18
3.3. Određivanje brzine ispitivanja.....	19
3.4. Utjecajni faktori na rezultate ispitivanja.....	20
3.4.1. Utjecaj temperature ispitivanja.....	20
3.4.2. Primjeri krivulja ohlađivanja čelika u ovisnosti o dimenzijama i temperaturi ispitnog uzorka.....	23
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	26
4.1. Plan ispitivanja.....	26
4.2. Izbor materijala i pregled opreme korištene prilikom ispitivanja.....	27

4.3. Ohlađivanje epruvete.....	30
4.4. Rezultati ispitivanja.....	33
4.4.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za meki čelik.....	34
4.4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za aluminij.....	37
5. ANALIZA REZULTATA.....	41
5.1. Meki čelik.....	41
5.2. Aluminij.....	43
6. ZAKLJUČAK.....	46
LITERATURA.....	47
PRILOZI.....	48

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Općeniti $\sigma$ - $\epsilon$ dijagram.....	3
Slika 2.2. Konvencionalna granica razvlačenja [1].....	5
Slika 2.3. Kidalica.....	6
Slika 2.4. Shema kidalice.....	7
Slika 2.5. Nasadni ekstenzometar.....	8
Slika 2.6. Automatski kontakti ekstenzometar.....	9
Slika 2.7. Video ekstenzometar.....	10
Slika 2.8. Laserski ekstenzometar.....	10
Slika 2.9. Skica okrugle epruvete.....	12
Slika 2.10. Skica četvrtaste epruvete.....	12
Slika 2.11. Nepravilno i pravilno pozicioniranje epruvete [2].....	13
Slika 3.1. Shema ekstenzometra za snižene temperature [3].....	15
Slika 3.2. Komora za ohlađivanje montirana na kidalicu.....	18
Slika 3.3. Shematski prikaz kriostata za statičko vlačno ispitivanje u tekućem heliju [4].....	19
Slika 3.4. Dijagrami za određivanje brzine opterećivanja [5].....	20
Slika 3.5. Utjecaj snižavanja temperature za opći konstrukcijski čelik [1].....	21
Slika 3.6. Utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja čelika S235JR.....	22
Slika 3.7. Utjecaj snižene temperature na granicu razvlačenja [6].....	22
Slika 3.8. Promjena istezljivosti (gornja slika) i granice razvlačenja (donja slika) u odnosu na snižavanje temperature za tehnički čiste materijale sa BCC rešetkom i Ni sa FCC rešetkom [7].....	23
Slika 3.9. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u etanolu na -40 °C [5].....	24
Slika 3.10. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u etanolu na -78 °C [5].....	24
Slika 3.11. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u tekućem dušiku na -196 °C [5].....	25
Slika 4.1. Komora za ohlađivanje.....	26
Slika 4.2. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama.....	27
Slika 4.3. Kidalica EU 40 MOD.....	28
Slika 4.4. Nasadni ekstenzometar.....	29
Slika 4.5. Fluke 568 IR Thermometer.....	29
Slika 4.6. Iskra termomer 21.....	30
Slika 4.7. Ohlađivanje pomoću suhog leda i alkohola.....	31
Slika 4.8. Spremnik sa tekućim dušikom.....	31
Slika 4.9. Dijagram porasta temperature mekog čelika sa 0 °C.....	32
Slika 4.10. Dijagram porasta temperature aluminija sa 0 °C.....	32
Slika 4.11. Mjesto mjerenja temperature nakon loma.....	33
Slika 4.12. Dijagrami sila-produljenje epruveta 1 mekog čelika.....	34, 35
Slika 4.13. Dijagrami sila-produljenje epruveta 1 aluminija.....	37, 38, 39
Slika 5.1. Histogram vlačne čvrstoće mekog čelika.....	41
Slika 5.2. Histogram donje granice razvlačenja mekog čelika.....	42
Slika 5.3. Histogram gornje granice razvlačenja mekog čelika.....	42
Slika 5.4. Histogram istezljivosti mekog čelika.....	43
Slika 5.5. Histogram vlačne čvrstoće aluminija.....	44
Slika 5.6. Histogram istezljivosti aluminija.....	44
Slika 5.7. Histogram konvencionalne granice razvlačenja aluminija.....	45

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Oblici i dimenzije različitih izvedbi okruglih i četvrtastih epruveta različitih po početnoj mjernoj duljini.....	11
Tablica 3.1. Oznake temperature epruveta, ispitivanja i vrijeme ohlađivanja.....	16
Tablica 4.1. Kemijski sastav epruveta.....	27
Tablica 4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja mekog čelika na sobnoj temperaturi.....	36
Tablica 4.3. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja mekog čelika na 0 °C.....	36
Tablica 4.4. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja mekog čelika na -40 °C.....	36
Tablica 4.5. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja mekog čelika na -100 °C.....	37
Tablica 4.6. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja aluminijske na sobnoj temperaturi.....	39
Tablica 4.7. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja aluminijske na 0 °C.....	39
Tablica 4.8. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja aluminijske na -40 °C.....	40
Tablica 4.9. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja aluminijske na -100 °C.....	40



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	naprezanje
$\varepsilon$	mm/mm	istezanje
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	granica razvlačenja
$R_{eL}$	N/mm <sup>2</sup>	donja vrijednost granice razvlačenja
$R_{eH}$	N/mm <sup>2</sup>	gornja vrijednost granice razvlačenja
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	konvencionalna granica razvlačenja
$R_k$	N/mm <sup>2</sup>	konačno naprezanje
$E$	N/mm <sup>2</sup>	modul elastičnosti
$A$	%	istezljivost
$d_0$	mm	početni promjer epruvete
$S_0$	mm <sup>2</sup>	početna površina presjeka epruvete
$L_0$	mm	početna mjerna duljina epruvete
$L_c$	mm	ispitna duljina epruvete
$L_t$	mm	ukupna duljina epruvete
$a_0$	mm	debljina pravokutnog uzorka
$b_0$	mm	širina pravokutnog uzorka
$T$	°C	definirana temperatura ispitivanja
$T_i$	°C	naznačena temperatura ili izmjerena temperatura na površini epruvete
$t_s$	min	vrijeme ohlađivanja
$Z$	%	suženje (kontrakcija)
$F_m$	N	maksimalna sila

## SAŽETAK

U završnom radu opisana je metoda statičkog vlačnog ispitivanja metalnih materijala pri sniženim temperaturama sukladno normama HRN EN ISO 6892-3:2015 i HRN EN ISO 6892-4:2015. Njom se određuju osnovna mehanička svojstva metalnih materijala na sniženim temperaturama. Također je dan pregled opreme potrebne za takvo ispitivanje i zahtjevi na nju. Iz literaturnih izvora određeni su i proučeni faktori utjecaja na rezultate ispitivanja. U zadnjem dijelu provedeno je ispitivanje mekog čelika i aluminija te analiza rezultata primjenom stečenog znanja. Ispitivanje se provodilo na tri različite snižene temperature (0 °C, -40 °C, -100 °C) uz ispitivanja na sobnoj temperaturi za usporedbu rezultata.

Ključne riječi: statičko vlačno ispitivanje, snižene temperature, meki čelik, aluminij

## SUMMARY

This work describes tensile test method at low temperatures according to HRN EN ISO 6892-3:2015 and HRN EN ISO 6892-4:2015 standards. These standards help to determine fundamental mechanical properties of metallic materials at low temperatures. The work also deals with equipment and requirements necessary for this kind of testing. Influences on the results during testing are determined from literature sources. In the last part of work mild steel and aluminium test samples are tested after which analysis of results is conducted. The tests have been conducted on three different low temperatures (0 °C, -40 °C, -100 °C) as well as room temperature testing for comparing the results.

Keywords: tensile testing, low temperatures, mild steel, aluminium

## 1.UVOD

Razvoj strojarskih materijala, u najvećem dijelu metala bio je usko povezan s ljudskim rodom kroz povijest. Značaj razvoja strojarskih materijala u današnje doba je vrlo velik, jer od tog značaja ovise sve strojarske konstrukcije, proizvodnja, energetika te automatizacija. Kako današnja industrija ovisi o razvoju materijala uvelike se mora pridavati važnost ispitivanju njih samih te njihovih svojstava. Materijali se razlikuju po svojstvima, a svako od njih nosi neke prednosti i neke mane. Svojstva materijala mogu se podijeliti na mehanička (čvrstoća, tvrdoća, žilavost, dinamička, izdržljivost, itd.), tehnološka (livljivost, kovkost, rezljivost, zavarljivost, itd.), fizikalna (boja, toplinska vodljivost, električna vodljivost, itd.), kemijska (otpornost na koroziju, utjecaj kiselina i lužina, itd.). Među najvažnijima su mehanička svojstva koja možemo opisati kao mehaničku otpornost materijala. Mehanička otpornost materijala određena je njegovim mehaničkim svojstvima. Mehanička svojstva imaju veliko značenje jer se pomoću njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i elementi konstrukcija. Prilikom dimenzioniranja potrebno je sagledati intenzitet, način te trajanje svih mogućih mehaničkih opterećenja koja će se pojaviti tijekom eksploatacije. Stoga se strojni dijelovi odnosno dijelovi konstrukcija dimenzioniraju na osnovu onih mehaničkih svojstava koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala za određene eksploatacijske uvjete. Osnovni je cilj da se tijekom eksploatacije ne pojavi lom odnosno plastična ili trajna deformacija što bi funkcionalno onemogućilo rad strojnog dijela ili čitave konstrukcije i izazvalo nesreću. Strukturno stanje nekog materijala dobiva se obradom materijala određenog (kemijskog) sastava određenim tehnološkim postupkom. Izbor materijala i tehnološki postupak omogućuje nam postizanje ciljanog (mikro)strukturnog stanja koje će dati željena (mehanička) svojstva. No, nažalost proračun će samo vrijediti u slučaju idealne tvari. Razlog tome je prisutnost različitih nepravilnosti u strukturi koje onemogućavaju točan proračun konkretnog materijala. Nepravilnosti mogu biti unutar kristalne građe, nulte, prve, druge i treće dimenzije. Iz tog razloga moguće ih je utvrditi isključivo eksperimentalnim putem. Na području ispitivanja mehaničkih svojstava materijala razvijena je različita laboratorijska oprema. Naime pri takvim ispitivanjima često se nastoje imitirati uvjeti u kakvim će određeni materijal biti opterećen tijekom eksploatacije. Temperatura eksploatacije iznimno je bitna zato što prilikom njene promjene dolazi i do promjena mehaničkih svojstava materijala. Uobičajena temperatura ispitivanja je sobna temperatura (oko 20 °C) i na njoj se bilježe rezultati. Tokom upotrebe materijala gdje se

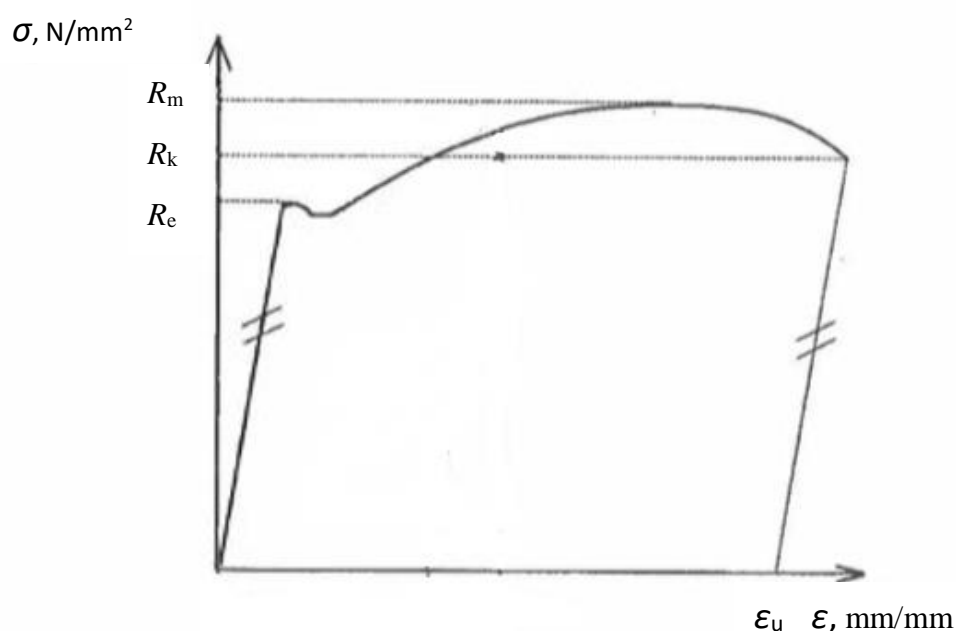
razvijaju povišene i visoke temperature ili su okolišni uvjeti pri povišenim temperaturama od iznimne važnosti je imitiranje tih temperatura prilikom ispitivanja. Na isti način kako su bitne povišene i visoke temperature jednako su bitne i snižene temperature koje se javljaju prilikom eksploatacije materijala u ekstremnim temperaturnim područjima zemlje poput Sibira, Grenlanda, itd. Ispitivanja mehaničkih svojstava na sniženim temperaturama veliku primjenu nalaze i u svemirskoj tehnologiji.

## 2. OPĆENITO O STATIČKOM VLAČNOM ISPITIVANJU

### 2.1. Određivanje mehaničkih svojstava statičkim vlačnim ispitivanjem

Statičko vlačno ispitivanje odvija se primjenom jednoosnog vlačnog naprezanja na ispitnom uzorku uz neznatnu promjenu brzine. Za metalne materijale provodi se sukladno normi HRN EN ISO 6892-1:2016.

Mehanička svojstva dobivena ovim ispitivanjem su:  $R_m$  (vlačna čvrstoća),  $R_e$  (granica razvlačenja),  $E$  (modul elastičnosti),  $A$  (istežljivost),  $\epsilon_u$  (ukupno produljenje epruvete),  $R_k$  (konačno naprezanje).



**Slika 2.1. Općeniti  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagram**

Slika 2.1. prikazuje općeniti  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagram dobiven statičkim vlačnim pokusom na kojem su označene vrijednosti mehaničkih svojstava.

Iz dijagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  se mogu dobiti sljedeće veličine:

- vlačna čvrstoća ( $R_m$ )
- granica razvlačenja ( $R_e$ )
- gornja granica razvlačenja ( $R_{eH}$ )
- donja granica razvlačenja ( $R_{eL}$ )

- modul elastičnosti ( $E$ )

- istezljivost ( $A$ )

$R_m$  (vlačna čvrstoća) predstavlja omjer maksimalne sile postignute pri ispitivanju i površine početnog presjeka ispitnog uzorka, te se računa prema izrazu:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (2.1.)$$

$F_m$  je maksimalna sila, ali  $R_m$  nije maksimalno naprezanje jer se ne uzima u obzir stvarna nego početna površina presjeka epruvete. Vrlo je bitna karakteristika otpornosti konstrukcijskih materijala. Koristi se prilikom usporedbe različitih materijala, kontrole i osiguranja kvalitete materijala, te se na njenoj osnovi može zaključiti o strukturnom stanju tj. o prethodno provedenoj toplinskoj obradi.

$R_e$  (granica razvlačenja) predstavlja omjer odgovarajuće sile tečenja i površine početnog presjeka ispitnog uzorka. Karakteriziraju ju dvije vrijednosti  $R_{eH}$  i  $R_{eL}$ , a računa se prema izrazu:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (2.2.)$$

To je ona vrijednost naprezanja koja nam daje do znanja kada elastična deformacija materijala prelazi u plastično (trajno) područje.

$R_k$  (konačno naprezanje) predstavlja omjer sile pri kojoj epruveta puca i površine početnog presjeka ispitnog uzorka, izraz za računanje je:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (2.3.)$$

Definira se kao naprezanje koje dovodi do loma epruvete.

$E$  (modul elastičnosti) predstavlja omjer naprezanja i istezanja izazvanog naprezanjem u području elastičnih deformacija materijala po izrazu:

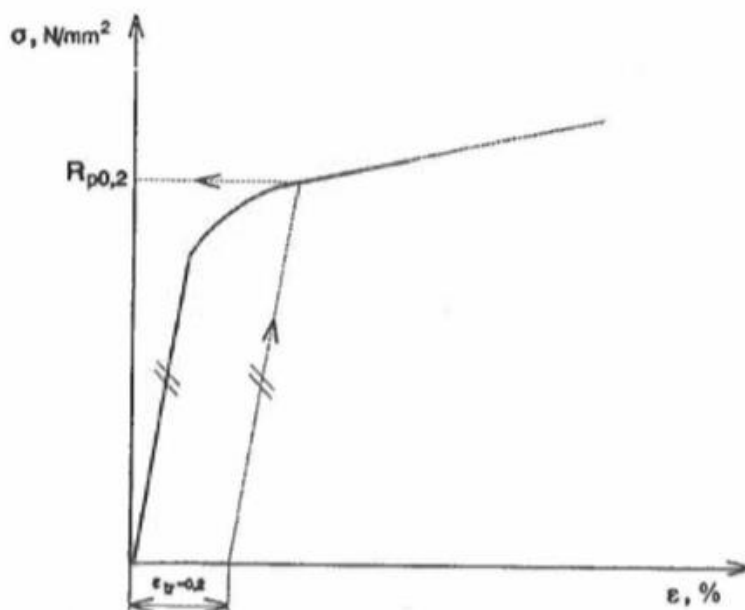
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ N/mm}^2 \quad (2.4.)$$

U  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagramu modul elastičnosti je nagib tzv. Hookeovog pravca sa završetkom u točki  $R_e$ . On ovisi o jačini veza između atoma i molekula.

A (istezljivost) predstavlja relativno produljenje materijala u uzdužnom smjeru u odnosu na početnu mjernu duljinu ispitnog uzorka, izraz za računanje istezljivosti:

$$A = \epsilon \cdot 100\% \quad (2.5.)$$

Kada prijelaz iz elastičnog u plastično područje materijala nije izražen određuje se  $R_{p0,2}$  što se naziva konvencionalna granica razvlačenja. Ona predstavlja naprezanje koje u materijalu izaziva plastičnu (trajnu) deformaciju od 0,2 %. Određuje se grafički pomoću  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagrama prikazano na slici 2.2.



Slika 2.2. Određivanje konvencionalne granice razvlačenja [1]

## 2.2. Oprema

### 2.2.1. Kidalica

Osnovi dio opreme za statičko vlačno ispitivanje čini kidalica ili univerzalni stroj za ispitivanja. Ime univerzalni dolazi od toga da se ne mora nužno koristiti za statičko vlačno ispitivanje nego i za druga statička ispitivanja npr. tlačna. Prilikom statičkog vlačnog ispitivanja epruveta (ispitni uzorak) se podvrgava postepenom povećanju jednoosnog opterećenja sve dok ne dođe do loma epruvete.

Slika 2.3. prikazuje tip kidalice kakvu možemo primjetiti u mehaničkim laboratorijima diljem svijeta. Raspon opterećenja kidalice ovisi o njenoj konstrukciji i vrsti pogona. Za primjenu



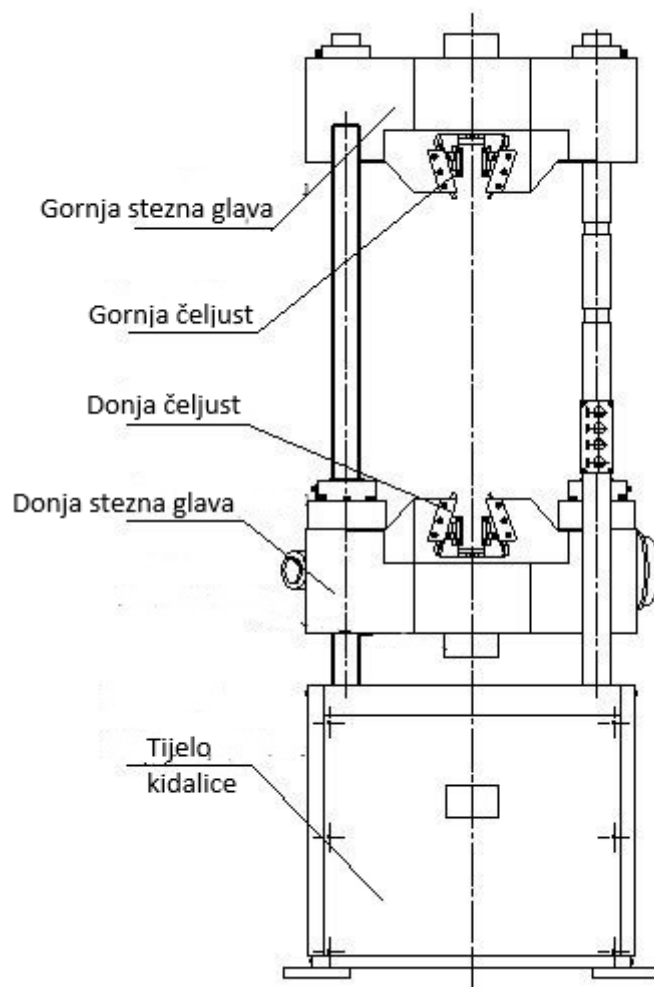
manjih sila može se koristiti mehanički pogon, dok je prilikom primjene većih sila potreban hidraulički pogon.



**Slika 2.3. Kidalica**

Slika 2.4. prikazuje konstrukciju kidalice koja se sastoji od tijela kidalice (postolja sa dva stabilna stupa koja služe kao vodilice za stezne glave). Unutar gornje i donje stezne glave nalaze se stezne čeljusti koje osiguravaju ravnomjeran prihvata epruvete prilikom ispitivanja.

Kidalice trebaju zadovoljavati normu HRN EN ISO 7500-1:2018. Unutar koje je opisan sustav ovjeravanja kidalica za statičko vlačno ispitivanje. Ovjeravanje se sastoji od generalne provjere testnog uređaja, baždarenja mjerne sile i potvrde o funkcionalnosti stroja i njegovih svojstava.



**Slika 2.4. Shema kidalice**

### 2.2.2. Ekstenzometri

Ekstenzometrija uključuje mjerenje i analizu promjene duljine epruvete prilikom statičkog vlačnog ispitivanja. Naprave za takva mjerenja nazivaju se ekstenzometri. Podliježu normi HRN EN ISO 9513:2012 unutar koje je opisan postupak umjeravanja i njihovog odabira za jednoosna ispitivanja. Njihova klasifikacija unutar norme je po klasama točnosti. Tako postoji Klasa 1 sa dozvoljenim odstupanjem rezultata od 1 %, Klasa 2 sa dozvoljenim odstupanjem rezultata od 2 %, itd.

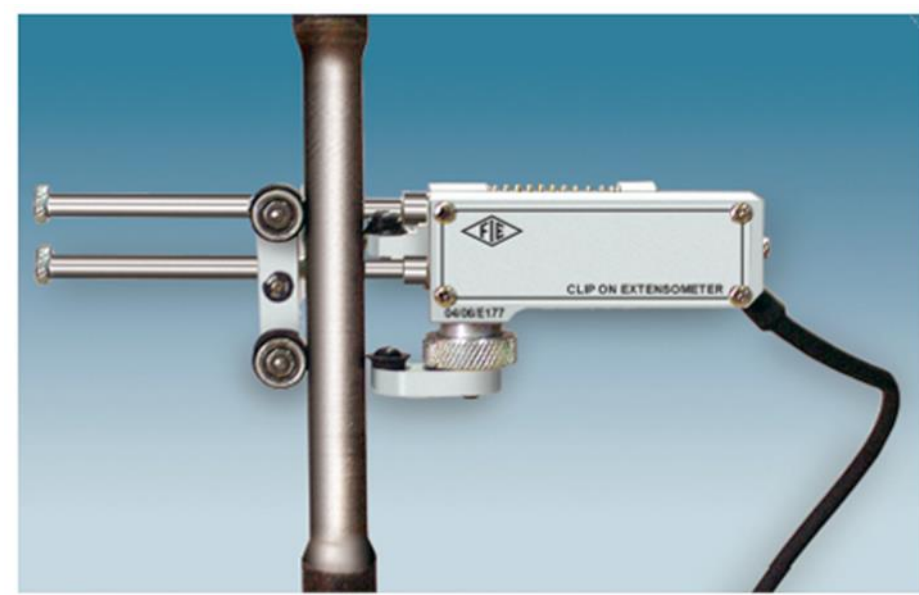
Ekstenzometre dijelimo na:

- Kontaktne – koristimo ih najčešće prilikom ispitivanja metalnih materijala zbog opasnosti od utjecaja na epruvetu kod krhkih materijala

- Bezkontaktne – koristimo ih kod krhkih epruveta ili kada postoji opasnost da energija loma epruvete može potrgati uređaj

#### 2.2.2.1. Vrste kontaktnih ekstenzometara

Nasadni ekstenzometri se koriste za epruvete od metala, te čvrste polimerne uzorke. U direktnom su kontaktu sa epruvetom preko vrhova kratkih i krutih indentora u obliku štapića. Tokom svakog ispitivanja postoji opasnost od oštećivanja uređaja. Velik je utjecaj operatera prilikom instaliranja uređaja na eprvetu. Na slici 2.5. vidimo primjer nasadnog ekstenzometra.



**Slika 2.5. Nasadni ekstenzometar**

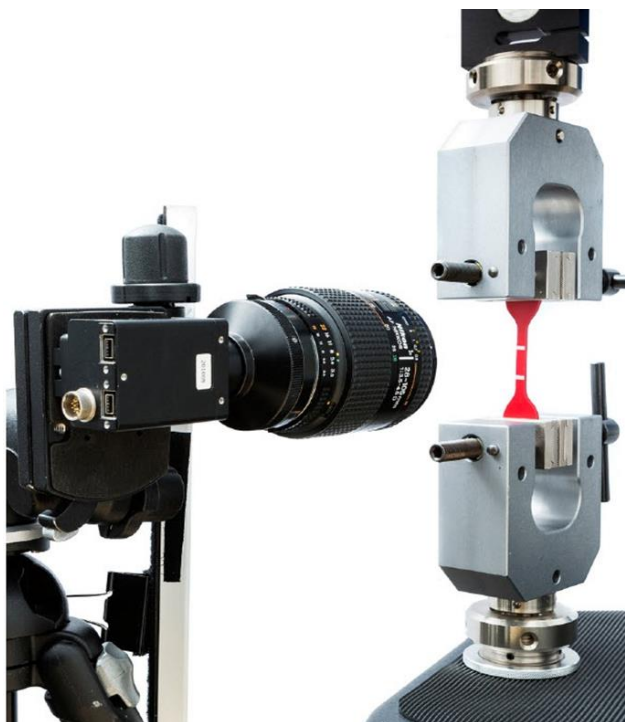
Automatski kontaktni ekstenzometar kontakt ostvaruje pomoću gornjeg i donjeg prihvata epruvete koji imaju oblik škarica. Kod njega je vrlo mali utjecaj operatera prilikom instaliranja i ispitivanja, te manja mogućnost utjecaja na svojstva epruvete nego kod nasadnih ekstenzometara. Stezanje prihvata za eprvetu vrši se automatski. Primjer automatskog kontaktnog ekstenzometra prikazan je slikom 2.6.



**Slika 2.6. Automatski kontaktni ekstenzometar**

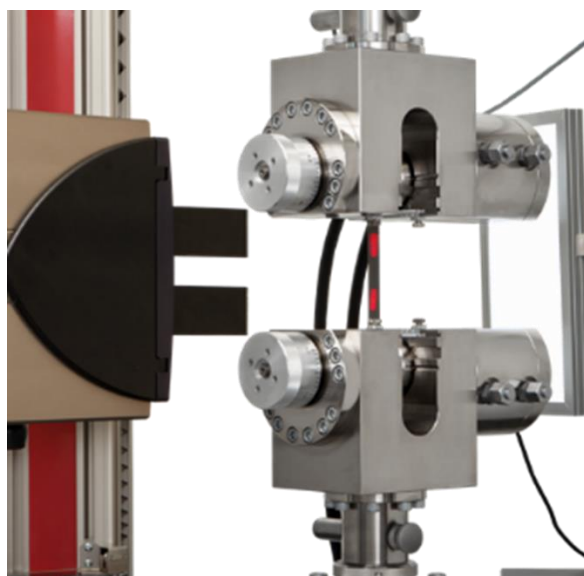
#### *2.2.2.2. Vrste bezkontaktnih ekstenzometara*

Kod video ekstenzometara jedno od glavnih stvari je postavljanje. Moraju se postavljati tako da imaju kompletan pregled duljine ispitivanja epruvete. Ne utječu na uzorak što je velika prednost u odnosu na kontaktne ekstenzometre. Daju mogućnost mjerenja u dvije osi (poprečno i uzdužno) i prikaz slike epruvete u svakom trenutku ispitivanja. Najveći nedostatak video ekstenzometara je problem vidljivosti i potreba za označavanjem epruvete. Video ekstenzometar prikazan je slikom 2.7.



**Slika 2.7. Video ekstenzometar**

Laserski ekstenzometri su najnovija vrsta ekstenzometara sa najvećom klasom točnosti (čak i prilikom jako malih deformacija). Prilikom odabira ovakve vrste ekstenzometara mora se dobro paziti na odnos razlučivosti i vidnog polja. Od nedostataka bitno je navesti osjetljivost na protok zraka, ali nema potrebe za označavanjem epruvete. Izgled laserskog ekstenzometra prikazan je slikom 2.8.



**Slika 2.8. Laserski ekstenzometar**

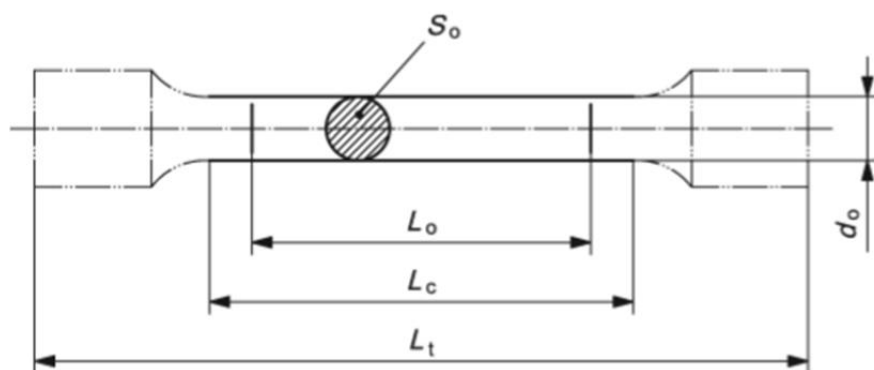
### 2.3. Ispitni uzorak (epruveta)

Prilikom ispitivanja materijala cilj je odrediti prikladnost materijala za njegovu upotrebu. Ispitni uzorak mora dostojno i reprezentativno predstavljati materijal u primjeni. Drugim riječima, on mora biti iz iste šarže i podvrgnut istim koracima obrade. Često je teško točno uskladiti ispitne uzorke sa strukturom ispitivanog materijala. Uobičajena praksa za testiranje velikih odljevaka, otkovaka i složenih proizvoda je dodavanje materijala s ciljem dobivanja ispitnih uzoraka. Isti taj dodatni materijal odvaja se od gotovog dijela te se koristi kao ispitni uzorak koji je podvrgnut istim koracima obrade kao i gotov proizvod. U praksi ti uzorci možda neće u potpunosti odgovarati gotovom proizvodu, ali će biti dovoljno reprezentativni za ispitivanje. Za važna ispitivanja jedan ili više gotovih proizvoda mogu se žrtvovati kako bi se dobili ispitni uzorci od najkritičnijih područja. Postoji poseban slučaj u kojem je cilj ispitivanja procijeniti metodu ispitivanja, a ne materijal. Tada ispitni uzorci moraju biti što je više moguće jednaki, tako da razlike u rezultatima ispitivanja predstavljaju, koliko je to moguće, samo varijabilnost u procesu ispitivanja. Prilikom pripreme uzorka najbitnije je imati na umu da je uzorak reprezentativna količina materijala nekog većeg dijela. Za jedno ispitivanje potrebno je napraviti više uzoraka. Njihova obrada mora biti što kvalitetnija i ujednačenija kako bi se postigli točni rezultati. Poseban naglasak je na os uzorka za koju je bitno ispravno poravnavanje sa smjerom valjanja materijala, smjerom gnječenja zrna, itd. Ispitni uzorak za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama naziva se i epruveta. Normirani oblici ispitnih uzoraka mogu biti okruglog, četvrtastog i rijetko nekog drugačijeg presjeka. U pravilu i najčešće su to uzorci okruglog presjeka. Uz razliku u presjeku epruvete dijelimo ih i po početnoj mjernoj duljini  $L_0$ . Skice okrugle i pravokutne epruvete prikazane su slikama 2.9. i 2.10.

**Tablica 2.1. Oblici i dimenzije različitih izvedbi okruglih i pravokutnih epruveta različitih po početnoj mjernoj duljini**

Tip ispitnog uzorka	Početna mjerna duljina $L_0$ [mm]
Duga epruveta	$11,3 \cdot \sqrt{S_0}$
Kratka epruveta	$5,56 \cdot \sqrt{S_0}$

U izvješću o rezultatima ispitivanja uvijek se mora navesti i vrsta epruvete korištena pri ispitivanju.



Slika 2.9. Skica okrugle epruvete

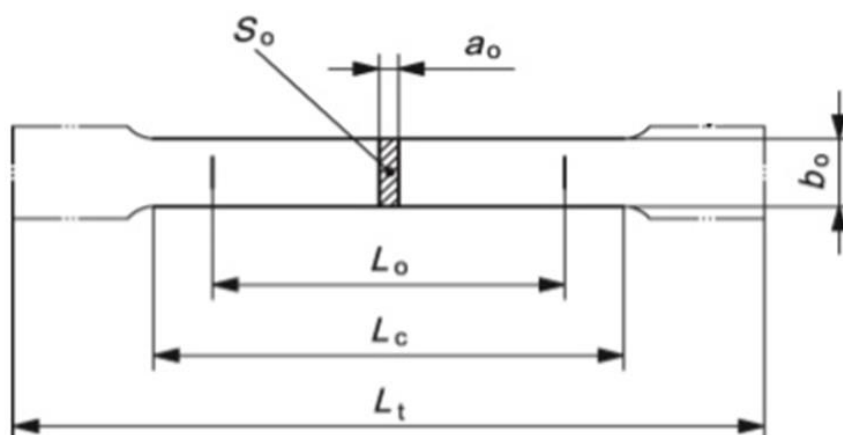
$d_0$  – početni promjer epruvete, mm

$S_0$  – početna površina presjeka epruvete, mm<sup>2</sup>

$L_0$  – početna mjerna duljina epruvete, mm

$L_c$  – ispitna duljina epruvete, mm

$L_t$  – ukupna duljina epruvete, mm



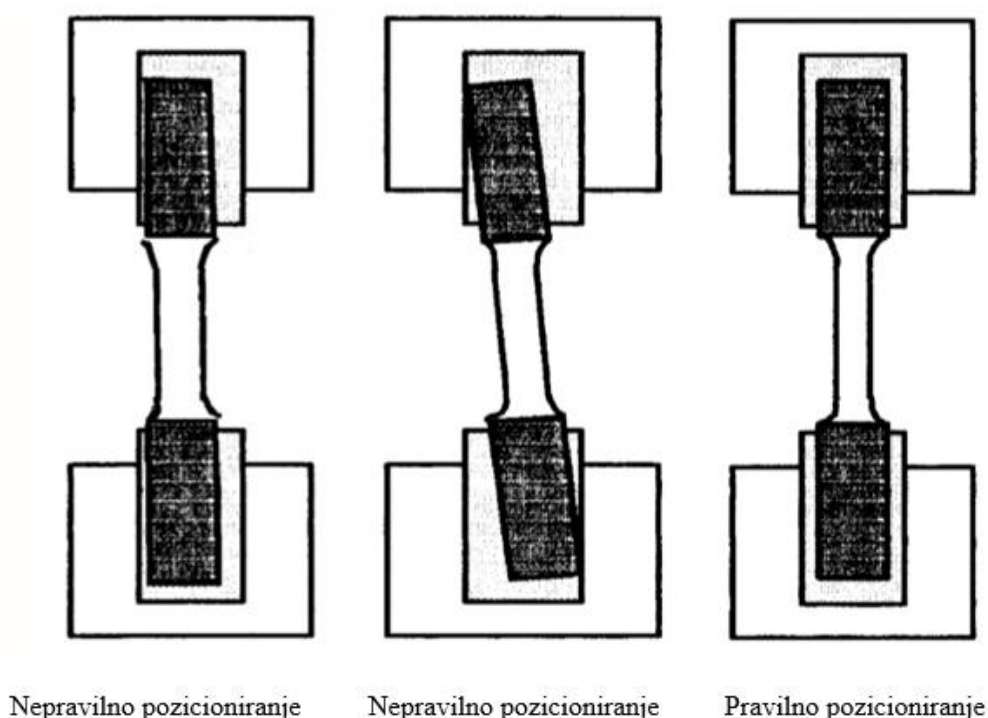
Slika 2.10. Skica pravokutne epruvete

$a_0$  – debljina pravokutnog uzorka, mm

$b_0$  – širina pravokutnog uzorka, mm

Za prihvata epruvete prije ispitivanja koriste se čeljusti u kidalici. Dvije stvari su bitne prilikom pozicioniranja epruvete u čeljust kidalice. Prva je da čeljust mora prijanjati uz glavu epruvete, a druga da taj spoj mora izdržati dovoljnu silu ispitivanja kako nebi došlo do oštećivanja. U idealnom slučaju čeljusti će imati iste dimenzije kao i glave epruveta. Međutim, u praksi to

nije stvar te postoji opasnost od zakretanja epruvete. Kada epruveta nije dobro postavljena dolazi do bočnog zakretanja tj. svako opterećenje izvan jedne osi vršiti će i savijanje epruvete. Takvi rezultati ispitivanja neće biti mjerodavni. Najbitnija stvar kod pravilnog postavljanja epruvete je iskustvo tehničara pa i samo ispitivanje uvelike ovisi o njemu. Jedan od načina rješavanja tog problema je i korištenje epruveta sa navojima na glavama što poboljšava pozicioniranje, ali uključuje i mane kao što su nekonzistentnost prilikom izrade navoja, rezanje toka silnica u epruveti, itd. Kod statičkog vlačnog ispitivanja pri sniženim temperaturama iznimno je bitno aksijalno poravnavanje epruvete jer metalni materijali pri nižim temperaturama imaju manju istežljivost pa su osjetljiviji na naprezanja.



**Slika 2.11. Nepravilno i pravilno pozicioniranje epruvete [2]**

Slika 2.11. prikazuje primjere nepravilnog i pravilnog postavljanja epruvete za statičko vlačno ispitivanje pri sniženim temperaturama.



### 3. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE PRI SNIŽENIM TEMPERATURAMA

#### 3.1. Općenito

Statičko vlačno ispitivanje pri sniženim temperaturama provodi se tako da epruvetu koja ima određenu vrijednost snižene temperature opteretimo jednoosnim vlačnim naprežanjem sa vrlo malom promjenom brzine čime simuliramo statičko naprežanje.

Rezultati ovog ispitivanja bitni su iz više razloga. Najvažnija primjena je pri izboru materijala za konstrukcijske primjene pri sniženim temperaturama. Prilikom izrade specifikacija pojedinih materijala spominju se njegova vlačna svojstva kako bi osigurala kvalitetu. Ispitivanja se također provode za vrijeme razvoja novih materijala i procesa, kako bi ih se usporedilo sa drugim materijalima i procesima. Uz sve navedeno vrlo bitno je i predviđanje ponašanja materijala u uvjetima statičkog vlačnog naprežanja pri sniženim temperaturama, a u tome nam pomaže uvid u elastično područje i čvrstoću materijala.

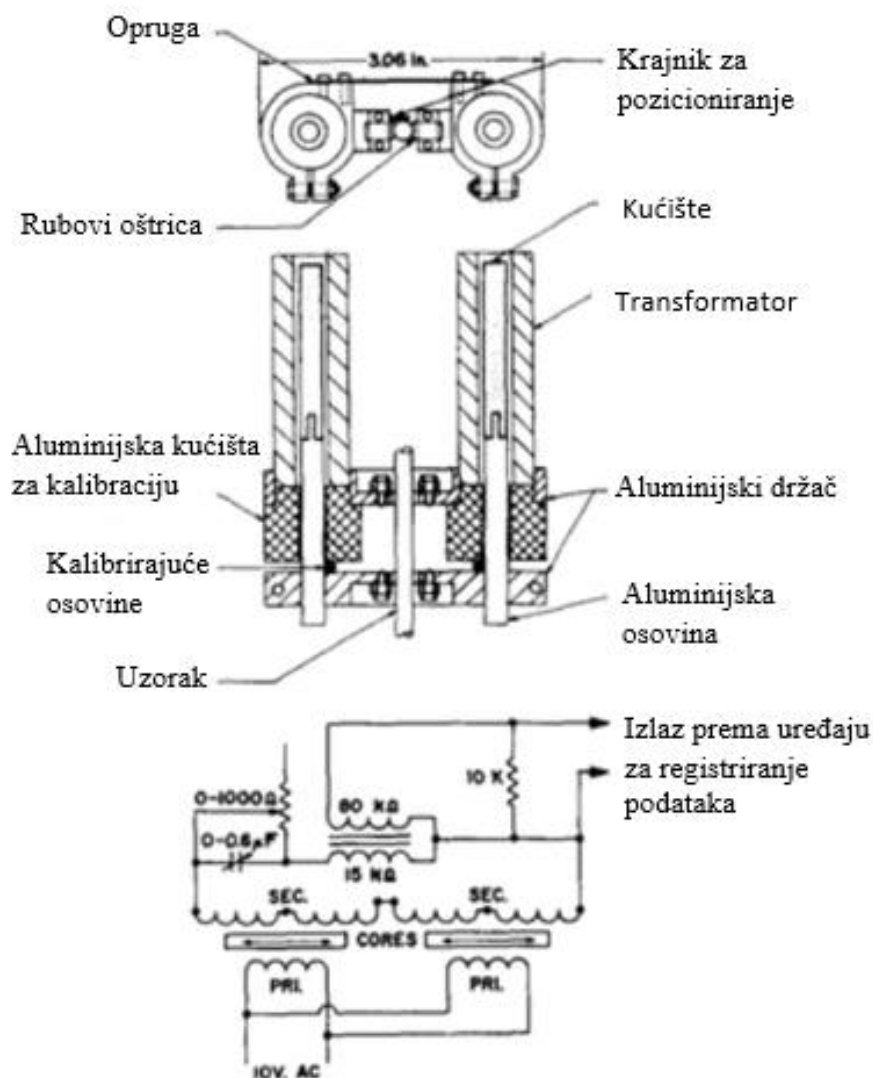
Statička vlačna ispitivanja pri sniženim temperaturama definirana su za temperaturno područje od 10 °C do -196 °C normom HRN EN ISO 6892-3, te od -196 °C do -269 °C normom HRN EN ISO 6892-4.

Tijekom statičkog vlačnog ispitivanja pri sniženim temperaturama koriste se kidalice identične onima za statičko vlačno ispitivanje na sobnoj temperaturi navedene u poglavlju 2.2.1. ovog rada. Ispitni uzorci također kao i kidalice isti su kao i kod statičkog vlačnog ispitivanja na sobnoj temperaturi opisani u poglavlju 2.3. ovog rada, te određeni i definirani normom HRN EN ISO 6892-1:2016.

##### 3.1.1. Ekstenzometar za snižene temperature

Ekstenzometri navedeni u poglavlju 2.2.2 ovog rada koriste se za rad i na sniženim temperaturama. No, međutim tijekom godina razvijanja ove metode ispitivanja razvijen je i ekstenzometar za snižene temperature. Prilikom izbora ekstenzometra za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama najbitniji je odabir kompatibilnog ekstenzometra zbog utjecaja temperature i njegove sukladnosti s uređajima za ohlađivanje. Svaki dio ekstenzometra koji se ne nalazi na temperaturi ispitivanja mora biti konstruiran s ciljem smanjivanja utjecaja okolišnih uvjeta na očitavanja. 1964. godine razvijen je ekstenzometar namijenjen isključivo ispitivanju na sniženim temperaturama prikazan na slici 3.1. Tijekom

testa potpuno se nalazi uronjen u tekući dušik ili je cijeli u komori za ohlađivanje. Ekstenzometar je klase točnosti 1 za cijelo ispitno područje i temperature od 20 do 300K.



Slika 3.1. Shema ekstenzometra za snižene temperature [3]

### 3.2. Ohlađivanje epruvete

#### 3.2.1. Općenita podjela

Glavni zahtjev sredstva za ohlađivanje epruvete je da mora biti sposoban ohladiti eprvetu na definiranu temperaturu ( $T$ ), odnosno na temperaturu ispitivanja. Tablica 3.1. pokazuje dodatne oznake bitne za ovaj dio rada.

**Tablica 3.1. Oznake temperatura epruveta, ispitivanja i vrijeme ohlađivanja**

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
$T$	$^{\circ}\text{C}$	definirana temperatura ispitivanja
$T_i$	$^{\circ}\text{C}$	naznačena temperatura ili izmjerena temperatura na površini epruvete
$t_s$	min	vrijeme ohlađivanja

Podjela sredstava za ohlađivanje su sljedeća:

- Komora za ohlađivanje
- Ekspanzija stlačenih plinova (npr.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ )
- Uranjanje u tekući dušik ili tekući helij

Statička vlačna ispitivanja pri sniženim temperaturama najčešće se provode u plinovitim ili tekućim sredstvima. Sredstvo za ohlađivanje ima velik utjecaj na vrijeme ohlađivanja i na prijenos topline tijekom ispitivanja (izotermički, adijabatski). Također postoji mogućnost da utječe i na rezultate ispitivanja.

#### 3.2.2. Zahtjevi i ovjeravanje mjernih uređaja za temperaturu

Mjerenje temperature vrlo je važno stoga se treba pridržavati određenih pravila definiranih normom:

- Kada je ispitna duljina manja od 50 mm, dva mjerna uređaja za temperaturu su potrebna. Svaki će se nalaziti na suprotnom kraju ispitne duljine. No, kada je ispitna

duljina veća ili jednaka 50 mm uz prethodna dva potrebno je koristiti i treći mjerni uređaj koji će se nalaziti u blizini središta ispitne duljine.

- Ako se epruveta nalazi u uzburkanom tekućem sredstvu za ohlađivanje za koje se može pretpostaviti da je homogeno, mjerenje se može provesti na bilo kojem dijelu sredstva
- Prilikom testiranja u tekućem dušiku nije potrebno mjerenje temperature. Međutim, u tom slučaju nedostatak mjerenja temperature potrebno je navesti u izvješću ispitivanja

Umjeravanje mjernih uređaja mora se provoditi minimalno jednom godišnje, nikako manje od navedenog. Sve nedostatke i popravke potrebno je zapisivati i čuvati u izvješću. Umjeravanje mora biti provedeno metodama koje se referiraju na SI jedinice temperature. Rezolucija opreme za mjerenje mora odgovarati ili biti bolja od 1 °C sa preciznošću  $\pm 2$  °C za raspon od +10 °C do -40 °C i  $\pm 3$  °C za raspon od -41 °C do -196 °C.

#### *3.2.2.1. Dopusštena odstupanja prilikom mjerenja temperature*

Dopusštena odstupanja između definirane temperature ( $T$ ) i naznačene temperature ( $T_i$ ) je  $\pm 3$  °C. To znači da temperaturni gradijent po površini epruvete ne smije prelaziti 3 °C. Temperatura na ispitnoj duljini treba se kontrolirati i nalaziti se unutar dopuštenih tolerancija sve dok se ne dostigne konačno naprezanje.

#### *3.2.3. Hlađenje pomoću komora za ohlađivanje i ekspanzije stlačenih plinova*

Komore za ohlađivanje epruveta do temperatura ispitivanja različitih su dimenzija ovisno o proizvođaču. No, postoje dvije tehnike ohlađivanja epruveta unutar komore. Pomoću tekućeg ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) vrijednosti temperatura kreću se od sobne temperature pa do -70 °C. Druga opcija je tekući dušik ( $\text{LN}_2$ ), a vrijednosti temperatura koje se njime postižu variraju od sobne temperature do -150 °C. Medij za ohlađivanje ušpicava se u komoru pokraj ventilatora koji osigurava njegovu jednoliku distribuciju unutar komore. Prilikom dosezanja željene temperature, kontroler temperature regulirati će protok tekućine kroz zavojnu cijev unutar komore. Komore se također sastoje i od ispušnog ventila koji odvodi otpadne plinove na zato predviđena mjesta. Kod korištenja tekućeg dušika komora mora sadržavati i ventil za stabiliziranje tlaka koji prilikom dosezanja vrijednosti tlaka od 3 bar otpušta višak tlaka iz komore. Slika 3.2. prikazuje komoru za ohlađivanje za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama montiranu na kidalicu iza koje se nalazi spremnik sa sredstvom za ohlađivanje.

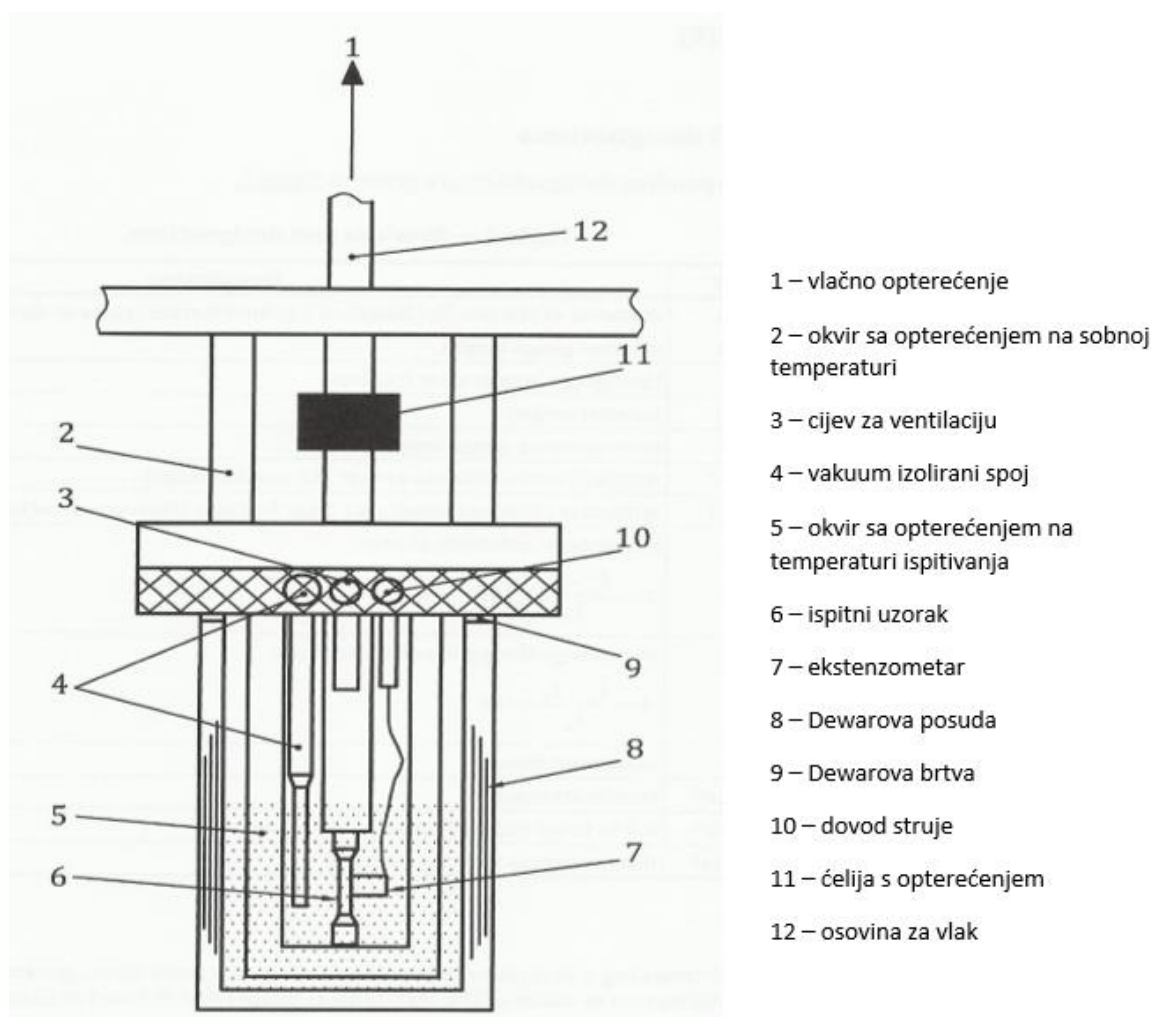


**Slika 3.2. Komora za ohlađivanje montirana na kidalicu**

Najbitniji zahtjev na izradu i dizajn komora je uz postizanje određene temperature i mogućnost korištenja svih vrsta ekstenzometara (kontaktnih i bezkontaktnih).

#### **3.2.4. Hlađenje pomoću tekućeg helija i tekućeg dušika**

Norma HRN EN ISO 6892-4:2015 definira statičko vlačno ispitivanje na temperaturama ispod  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  sve do  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Za vrijeme testa epruveta se nalazi u kriostatu<sup>1</sup> potpuno uronjena u tekući helij (LHe) na nominalnoj brzini ispitivanja koja iznosi  $10^{-3}\text{ s}^{-1}$  ili manjoj. Kriostat<sup>1</sup> – uređaj za ispitivanje primjenom vlačnog naprezanja na niskim temperaturama. Ispitivanje se provodi do loma radi utvrđivanja mehaničkih svojstava materijala. Tekući helij nalazi se u tzv. Dewarovoj posudi. Dewarova posuda je izolacijska posuda najčešće od stakla unutar koje je vakuum. Dewarova posuda za statičko vlačno ispitivanje u tekućem heliju izrađena je od nehrđajućeg čelika, maraging čelika, superlegure na bazi Ni ili titanove legure, zbog bolje otpornosti na pojavu i iniciranje pukotine od stakla. Ispitivanja su kratkotrajna zbog izdržljivosti posude, a ako su ispitivanja dužeg trajanja može se primjeniti kriostat napravljen od dvije Dewarove posude (jedna u drugoj). Mehaničke pumpe osiguravaju vakuum za vrijeme ispitivanja. Shematski prikaz kriostata prikazan je slikom 3.3. zajedno sa svim objašnjenjem dijelova.



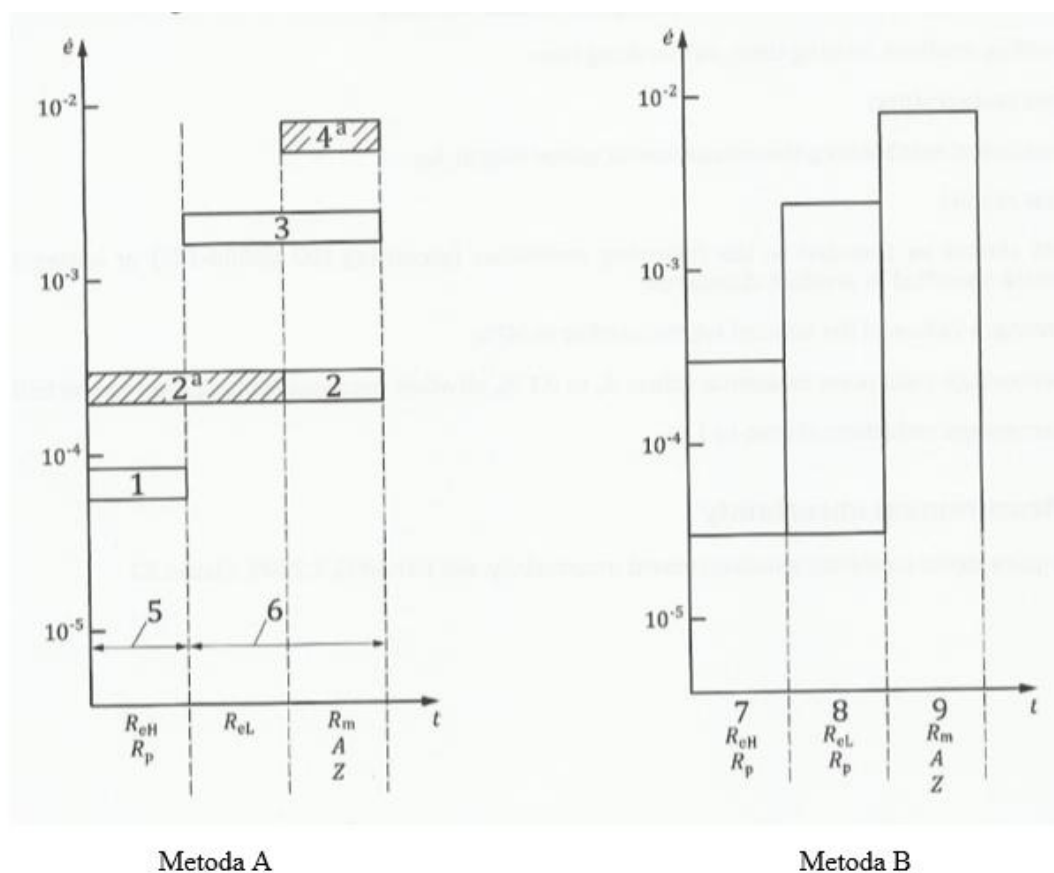
**Slika 3.3. Shematski prikaz kriostata za statičko vlačno ispitivanje u tekućem heliju [4]**

Ispitivanje se može provoditi i u tekućem vodik (LN<sub>2</sub>) sa istom opremom. Najbitnije je epruvetu držati potpuno uronjenu u medij tijekom cijelog ispitivanja kao i kod tekućeg helija.

### 3.3. Određivanje brzine ispitivanja

Za brzinu ispitivanja postoje dvije normirane metode. Metoda A i metoda B. Metoda A ili metoda za definiranje brzine ispitivanja koja se referira na kontrolu brzine deformacije epruvete. Namijenjena je minimaliziranju varijacija testnih brzina u trenutku određivanja osjetljivih parametara i minimaliziranju mjerne nesigurnosti na konačne rezultate ispitivanja. Metoda B ili metoda ispitivanja sa točno određenim konvencionalnim rasponom brzina opterećivanja. Za ovu metodu iako je točno određen raspon brzina opterećivanja utjecaj na vrijednosti parametara može biti znatan. Izbor metoda i brzina opterećivanja određuje proizvođač ili predstavnici laboratorija odobreni za to od strane proizvođača, osim ako

drugačije nije dogovoreno između stranaka. Normom su definirane brzine opterećivanja koje se koriste prilikom statičkog vlačnog ispitivanja pri sniženim temperaturama. One su definirane unutar dijagrama prikazanih slikom 3.4. u ovisnosti o metodi koja se koristi, te parametra koji se određuje.

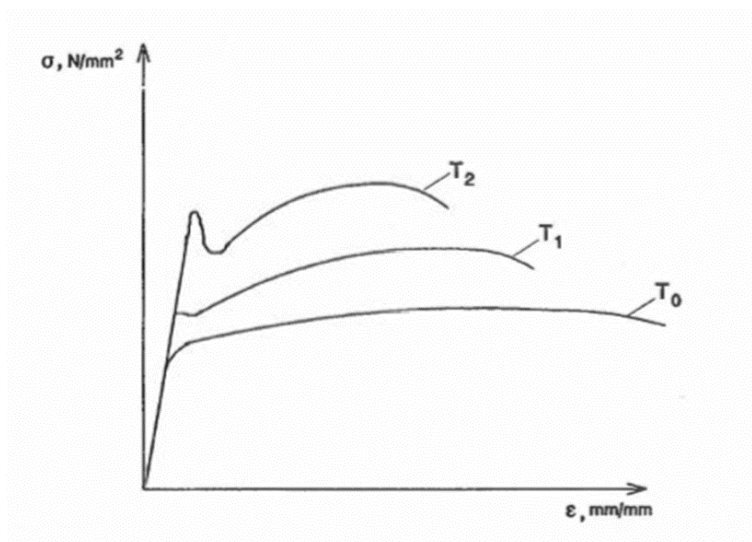


Slika 3.4. Dijagrami za određivanje brzine opterećivanja [5]

### 3.4. Utjecajni faktori na rezultate ispitivanja

#### 3.4.1. Utjecaj temperature ispitivanja

Kako bi dobili uvid u ponašanje materijala na sniženim temperaturama potrebno je provesti više statičkih vlačnih ispitivanja na različitim vrijednostima sniženih temperatura. Slika 3.5. prikazuje utjecaj snižavanja temperature na rezultate ispitivanja u  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagramu za konstrukcijske čelike.



**Slika 3.5. Utjecaj snižavanja temperature za opći konstrukcijski čelik [1]**

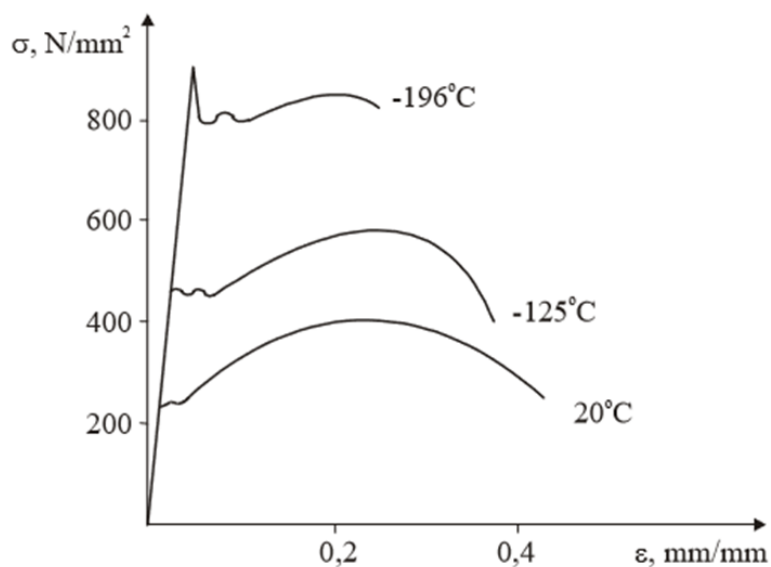
Krivulja  $T_0$  predstavlja sobnu temperaturu, dok temperature  $T_1$  i  $T_2$  snižene temperature uz relaciju:

$$T_0 > T_1 > T_2$$

Iz tog dijagrama za konstrukcijske čelike zaključujemo da snižavanjem temperature vrijednosti granice razvlačenja ( $R_e$ ) i vlačne čvrstoće ( $R_m$ ) rastu, komponente granice razvlačenja  $R_{eh}$  i  $R_{el}$  postaju sve izraženije. Nepromijenjeni nagib Hookeovog pravca sugerira nam nepromijenjenost modula elastičnosti ( $E$ ), dok se istezljivost ( $A$ ) zajedno sa relativnim produljenjem ( $\epsilon_u$ ) smanjuje.

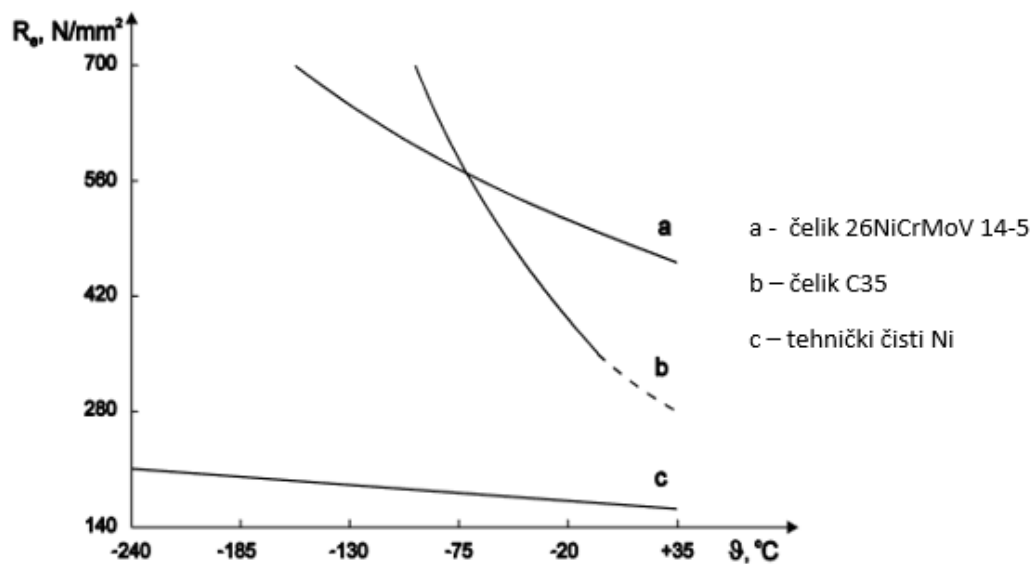
Konkretan primjer utjecaja snižene temperature možemo primjeniti kod čelika S235JR na slici 3.6.





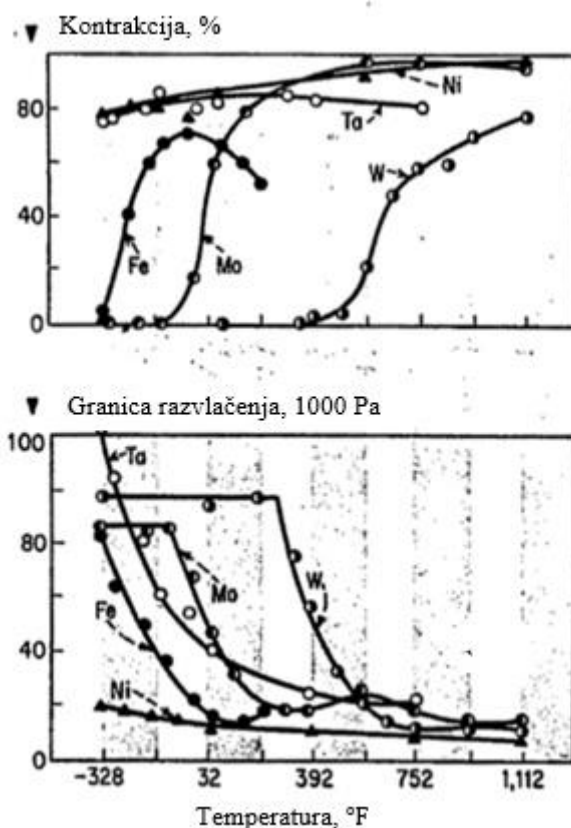
**Slika 3.6. Utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja čelika S235JR [6]**

Skloniji promjeni mehaničkih svojstava na sniženim temperaturama su legure sa BCC (prostorno centriranom kubičnom) rešetkom (svi čelici osim austenitnih) u odnosu na legure sa FCC (plošno centriranom kubičnom) rešetkom. Slika 3.7. prikazuje promjenu granice razvlačenja kod materijala sa BCC i FCC kristalnom rešetkom.



**Slika 3.7. Utjecaj snižene temperature na granicu razvlačenja [6]**

Iz slike 3.8. dobivamo uvid u ponašanje istezljivosti te granice razvlačenja tehnički čistih materijala sa BCC i Ni sa FCC rešetkom prilikom snižavanja temperature.



**Slika 3.8.** Promjena istezljivosti (gornja slika) i granice razvlačenja (donja slika) u odnosu na snižavanje temperature za tehnički čiste materijale sa BCC rešetkom i Ni sa FCC rešetkom [7]

### 3.4.2. Primjeri krivulja ohlađivanja čelika u ovisnosti o dimenzijama i temperaturi ispitnog uzorka

Krivulje prikazane slikama 3.9.; 3.10. i 3.11. prikazuju ohlađivanje ispitnih uzoraka sa sobne temperature sve do temperature ispitivanja. Krivulje ohlađivanja uzoraka ovise o debljinama uzoraka, a temperature su mjerene na površini ispitnog uzorka i u jezgri uzorka. Eksperimentalnim putem utvrđivane su ove krivulje i one nam mogu dati okvirne podatke o vremenu hlađenja ispitnih uzoraka od čelika na određene temperature. Kada se koriste mediji za ohlađivanje u plinovitom, a ne tekućem obliku vremena ohlađivanja mogu biti puno duža.

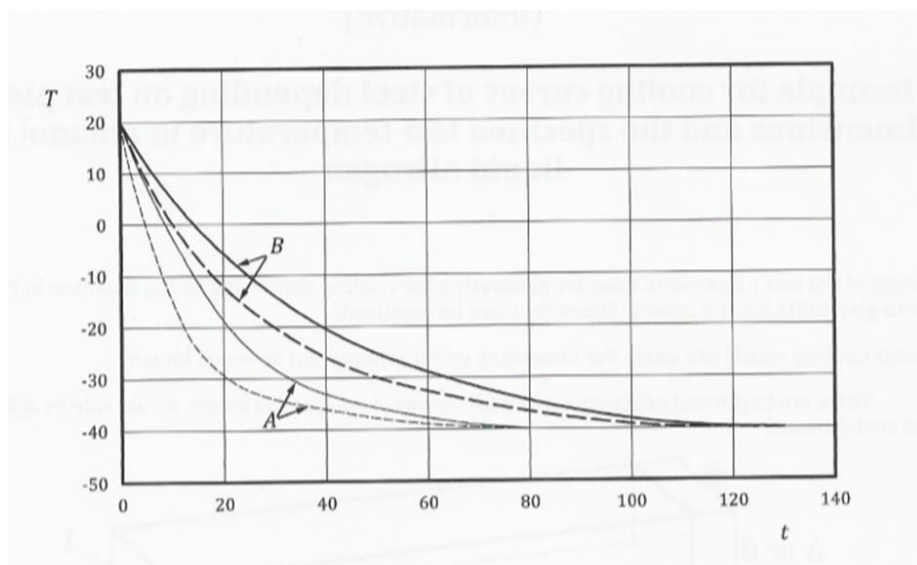
A – debljina uzorka : 5mm

B – debljina uzorka : 15mm

T – temperatura, °C

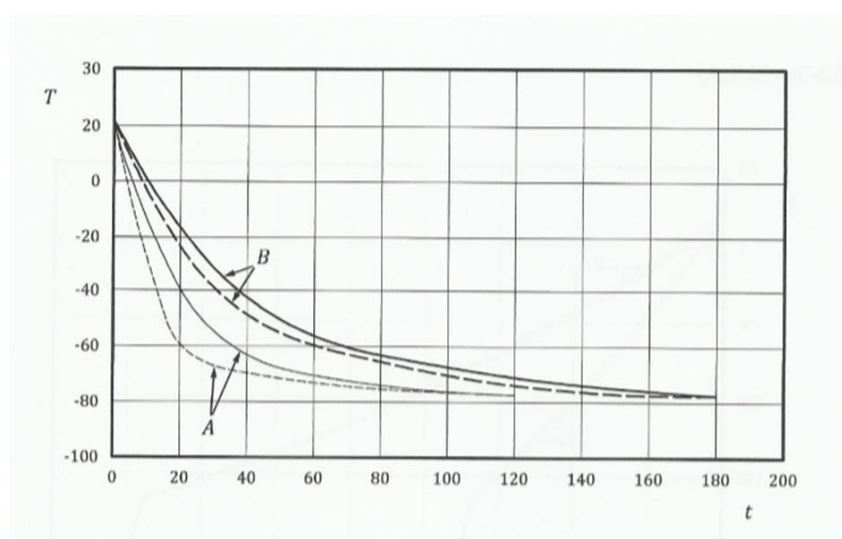
t – vrijeme, s

---- površina ispitnog uzorka, \_\_\_\_ jezgra ispitnog uzorka

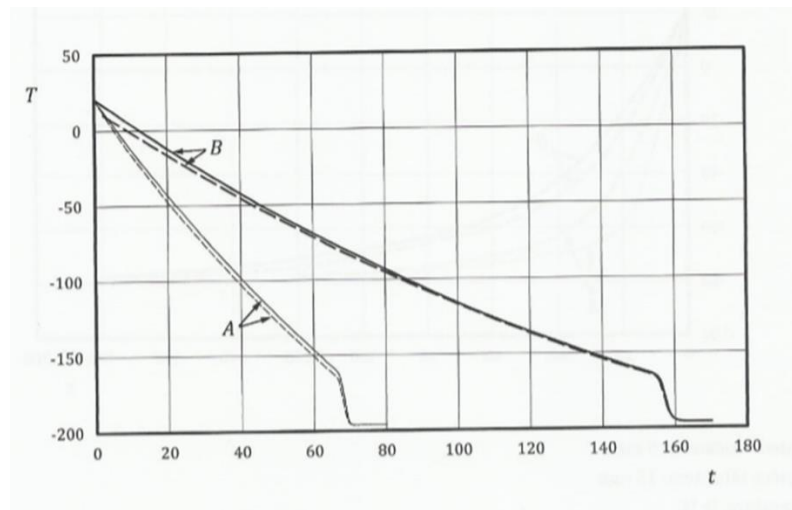


**Slika 3.9. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u etanolu na -40 °C [5]**

Iz slike 3.9. vidljivo je kako ohlađivanje na temperaturu od -40 °C uvelike ovisi o debljini uzorka, ali je i drastična razlika krivulja hlađenja površine i jezgre uzorka.



**Slika 3.10. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u etanolu na -78 °C [5]**



**Slika 3.11. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u tekućem dušiku na -196  $^{\circ}\text{C}$  [5]**

Slike 3.10. i 3.11. prikazuju manju razliku između temperature na površini i u jezgri uzorka tijekom smanjivanja temperature.

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu su provedena statička vlačna ispitivanja pri sniženim temperaturama te su analizirana dobivena mehanička svojstva.

### 4.1. Plan ispitivanja

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja tri različita materijala pri sobnoj temperaturi (23 °C, 0 °C, -40 °C, -100 °C. Prilikom statičkog vlačnog ispitivanja na određenim temperaturama pomoću ekstenzometra su praćene deformacije, te su dobivani podaci o mehaničkim svojstvima pojedinih materijala na konkretnim temperaturama. Dobiveni rezultati obrađeni su i analizirani te shodno njima donesen je i određeni zaključak.

Plan ispitivanja određen je s nekoliko koraka:

1. Odabir epruveta i njihova obrada
2. Ohlađivanje epruveta
3. Statičko vlačno ispitivanje
4. Analiza rezultata

Ispitivanja su provedena nekonvencionalnom metodom. Ispitni uzorci su ohlađeni u posudama u kojima se nalazio odgovarajući medij za snižavanje temperature (smjesa suhog leda i alkohola ili tekući dušik). Nakon ohlađivanja su epruvete postavljane u komore prikazane slikom 4.1. koje su prethodno ohlađene na temperaturu približne vrijednosti zadane temperature u odstupanju  $\pm 5$  °C.



**Slika 4.1. Komora za ohlađivanje**

## 4.2. Izbor materijala i pregled opreme korištene prilikom ispitivanja

Dimenzije i oblik epruveta za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama određen je normom HRN EN ISO 6892-1:2016. Obrada epruveta provedena je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Materijali od kojih su napravljene epruvete prikazane slikom 4.2. su meki čelik, aluminij te su okruglog su presjeka. Kemijskog sastav uzoraka dobiven je od dobavljača. Tablica 4.1. prikazuje kemijski sastav ispitivanih materijala.

**Tablica 4.1. Kemijski sastav ispitivanih materijala**

Materijal	Maseni udio pojedinih elemenata		
Meki čelik	0,15% C	0,033% Mo	ostatak Fe
Aluminij	5% Mg	1% Si	ostatak Al



**Slika 4.2. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama**

Statička vlačna ispitivanja provedena su na univerzalnoj kidalici u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Podatci o kidalici prikazanoj na slici 4.3.:

- Proizvođač: WPM, Njemačka
- Model: EU 40 MOD
- Mjerno područje: 0-400 kN

- Serijski broj: 990.06/83/85
- Klasa 1 (sukladno normi HRN EN ISO 7500-1:2018).



**Slika 4.3. Kidalica EU 40 MOD**

Na kidalicu je spojeno računalo za registriranje podataka sa softverskim paketom TireTest.

Za mjerenje i analizu produljenja korišten je nasadni ekstenzometar na slici 4.4. sljedećih podataka:

- Produvođač: Mess&Feinwerktechnik, Njemačka
- Model: MFA 2
- Razmaknutost ticala: 50 mm
- Hod: 2 mm
- Serijski broj:012872
- Klasa 1 (sukladno normi HRN EN ISO 9153:2012).



**Slika 4.4. Nasadni ekstenzometar**

Za potrebe kontrole temperature korištena su dva uređaja:

Fluke 568 IR Thermometer (slika 4.5.)

- Proizvođač: Fluke Corporation, SAD
- Model: Fluke 568 IR Thermometer
- Rezolucija: 0,1 °C
- Mjerno područje: (-40) - (+800) °C
- Odziv: 7 s



**Slika 4.5. Fluke 568 IR Thermometer**



Iskra termomer 21 (slika 4.6.)

- Proizvođač: Iskra, Slovenija
- Model: Termomer 21
- Mjerno područje:  $(-220) - (+800) ^\circ\text{C}$
- Odziv: 2 min



**Slika 4.6. Iskra termomer 21**

### 4.3. Ohlađivanje epruveta

Kako bi se postigle temperature od  $0 ^\circ\text{C}$  i  $-45 ^\circ\text{C}$  epruvete su uranjane u plastičnu posudu unutar koje se nalazila smjesa suhog leda i alkohola. Kod epruveta koje su ohlađivane na  $-40 ^\circ\text{C}$  temperatura smjese suhog leda i alkohola je iznosila  $-45 ^\circ\text{C}$  zbog vremena potrebnog za uklanjanje epruvete iz smjese, te postavljanja u kadalicu. Tijekom tog vremena epruveta je postigla vrijednost od  $-40 ^\circ\text{C}$ . Epruvete su se na temperaturi  $0 ^\circ\text{C}$  i  $-45 ^\circ\text{C}$  nalazile u smjesi 30 min. Slika 4.7. prikazuje primjer ohlađivanja epruveta pomoću smjese suhog leda i alkohola.



**Slika 4.7. Ohlađivanje pomoću suhog leda i alkohola**

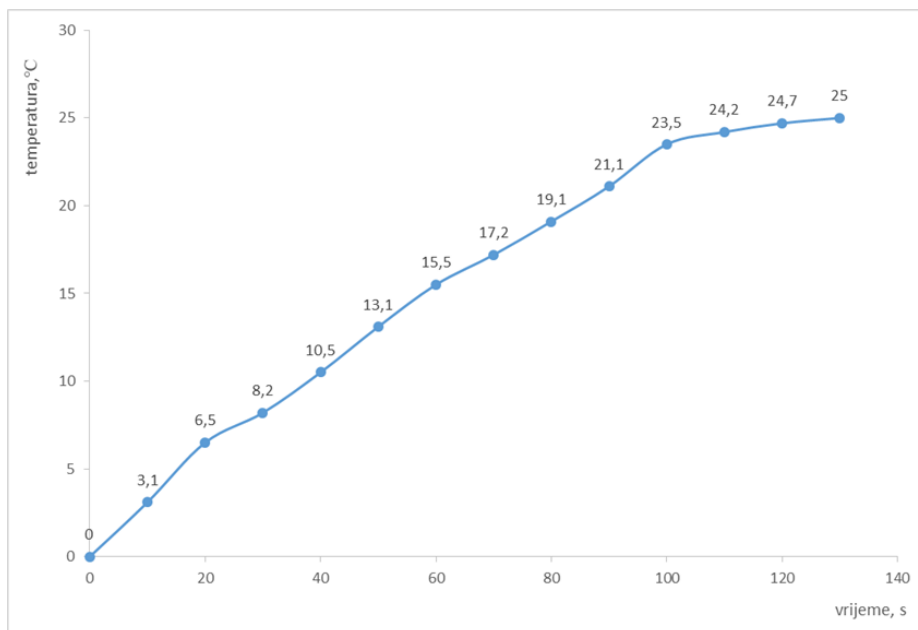
Hlađenje epruveta na  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  provodilo se uranjanjem epruveta u tekući dušik ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) koji se nalazio u spremniku prikazanom na slici 4.8. Kada je epruveta izvađena iz tekućeg dušika pratila se temperatura i prilikom dosezanja vrijednosti od  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  postavljena je u prihvatima kidalice za početak ispitivanja.



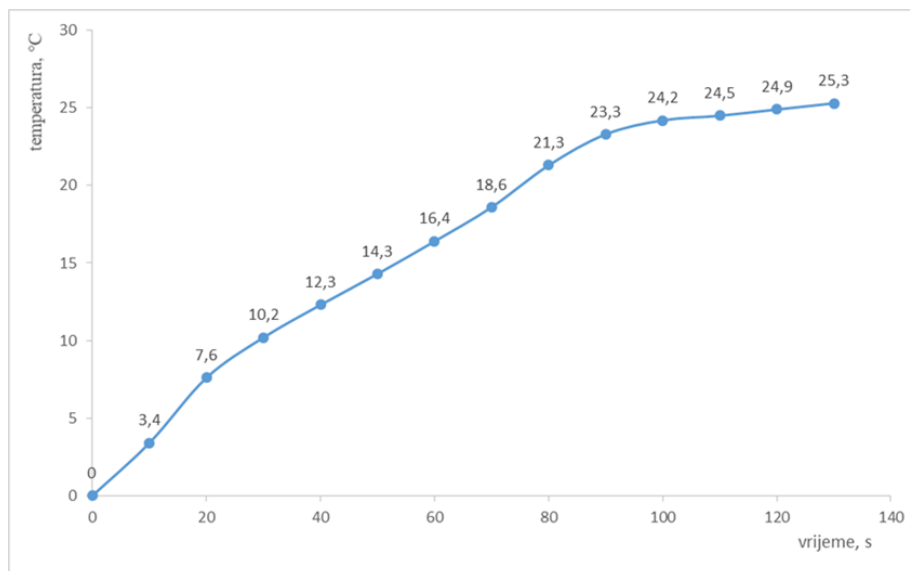
**Slika 4.8. Spremnik sa tekućim dušikom**

Nakon ohlađivanja ispitinih uzoraka oni su postavljeni u komoru koja je već postavljena na kadalici i koja je također prethodno ohlađena.

Provedena su mjerenja gubitka temperature tijekom prenošenja ispitnog uzorka iz posude za hlađenje u komoru za ispitivanje. Na slikama 4.9. i 4.10. je vidljiva promjena temperature na vanjskoj površini.



**Slika 4.9. Dijagram porasta temperature mekog čelika sa 0 °C**



**Slika 4.10. Dijagram porasta temperature aluminija sa 0 °C**

Tijekom postavljanja ispitnog uzorka u komoru pri samom ispitivanju bilo je potrebno oko 20 sekundi. Gubitak površinske temperature bi bio oko 6 °C. S obzirom da je temperatura u komori za hlađenje pri ispitivanju bila u granicama  $\pm 5$  °C moguće su oscilacije pri ispitivanju. Iz narednih provjera se može zaključiti da ova ispitivanja nije bilo moguće provesti sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO 6892-3:2015. Te će se ta odstupanja odraziti i na mjerne rezultate. Drugi problem je bio što su uređaji za mjerenje temperature imali dosta veliki odziv što također stvara veliku nesigurnost mjerenja temperature.

#### 4.4. Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja dani su kroz tablice i dijagrame sila-produljenje zabilježenim TireTest programom na računalu. Uz vrijednosti mehaničkih svojstava materijala mjerena je i temperatura na točki pucanja neposredno nakon loma epruvete na mjestu označenim slikom 4.11.

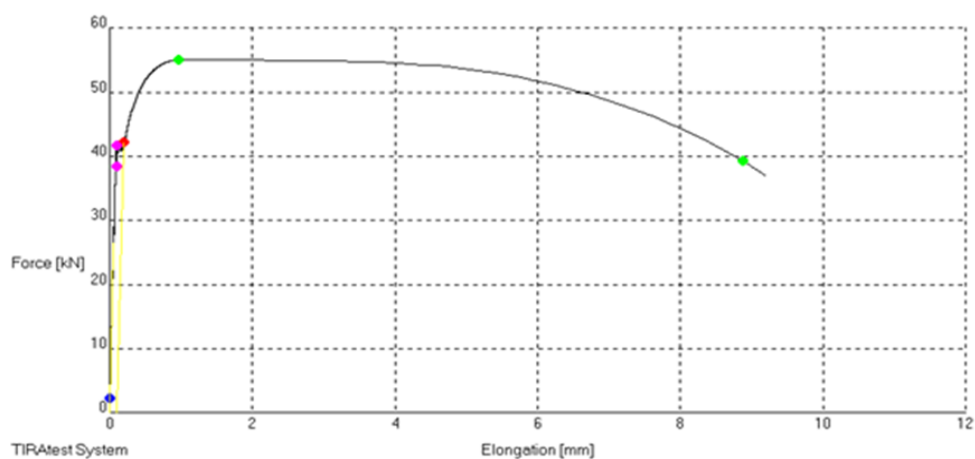


**Slika 4.11. Mjesto mjerenja temperature nakon loma**

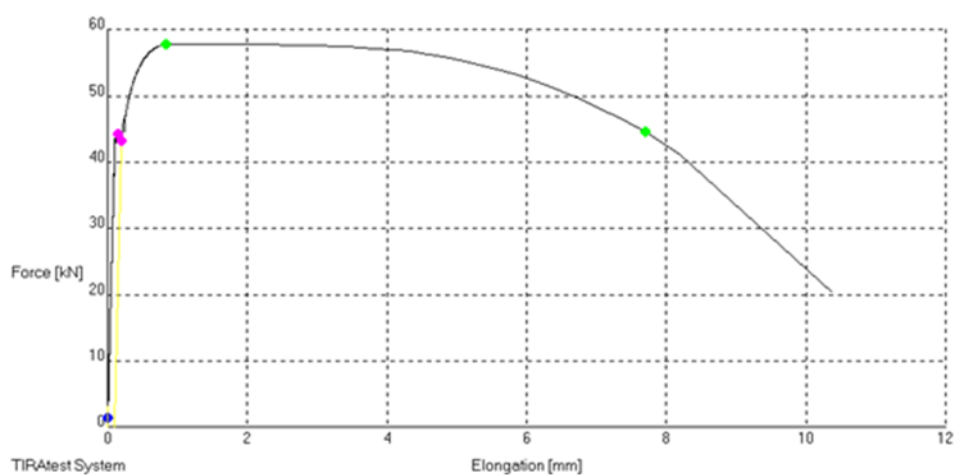
Predopterećenje na epruvetama iznosilo je 1,4 kN pri toj vrijednosti ekstenzometar se postavlja na uzorak. Temperatura u laboratoriju imala je vrijednost 23,8 °C. Ispitivanja na sobnoj temperaturi provedena su u svrhu usporedbe rezultata.

#### 4.4.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za meki čelik

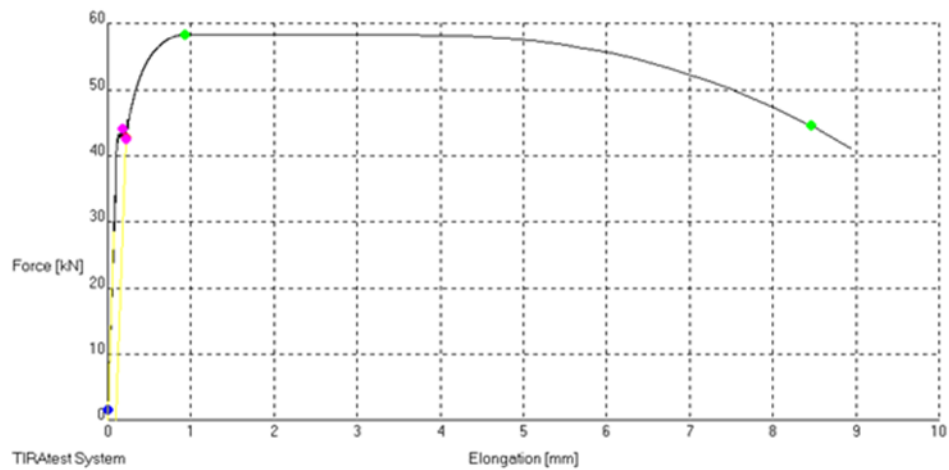
Rezultati ispitivanja za meki čelik dani su kroz tablice ovisno o temperaturi ispitivanja. U tablicama su također određene srednje vrijednosti mehaničkih svojstava koje će se analizirati. Na slici 4.9. dani su dijagrami sila-produljenje dobiveni softverskim paketom TireTest za epruvete 1 mekog čelika pri sniženim temperaturama. Svi ostali dijagrami mekog čelika na svim temperaturama uključujući tako i aluminij biti će dani u prilogu.



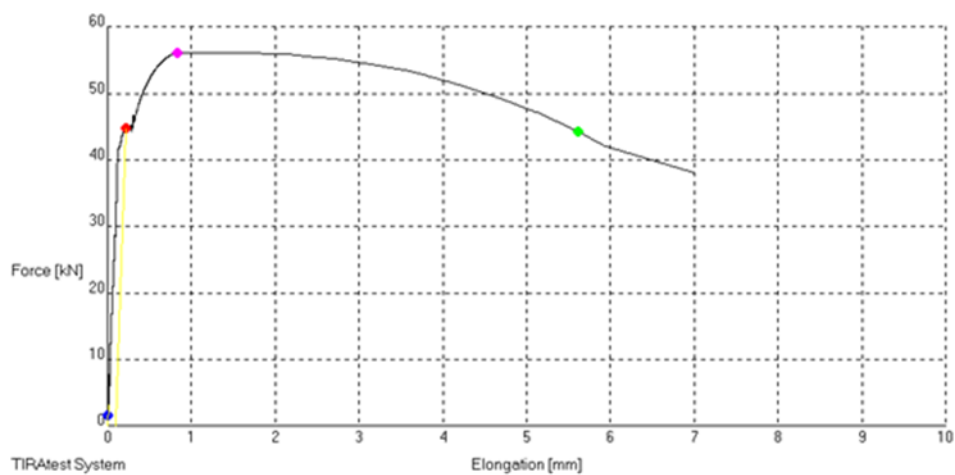
a)



b)



c)



d)

Slika 4.12. Dijagrami sila-produljenje epruveta 1 mekog čelika

a) sobna temperatura

b) 0 °C

c) -40 °C

d) -100 °C

**Tablica 4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja mekog čelika na sobnoj temperaturi**

<i>Broj epruvete</i>	<i>d<sub>0</sub>, mm</i>	<i>F<sub>m</sub>, kN</i>	<i>F<sub>k</sub>, kN</i>	<i>R<sub>eL</sub>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>R<sub>eH</sub>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>R<sub>m</sub>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>A, %</i>
1	12,00	55,00	39,22	340,22	368,33	486,28	27,32
2	11,99	57,26	37,73	336,42	371,07	506,33	26,93
3	12,00	56,68	37,32	339,75	381,47	501,12	27,12
			$\bar{X}$	338,8	373,62	497,91	27,12

**Tablica 4.3. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja mekog čelika na 0 °C**

<i>Broj epruvete</i>	<i>d<sub>0</sub>, mm</i>	<i>F<sub>m</sub>, kN</i>	<i>F<sub>k</sub>, kN</i>	<i>R<sub>eL</sub>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>R<sub>eH</sub>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>R<sub>m</sub>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>A, %</i>
1	11,97	57,75	44,52	383,53	393,46	513,14	25,83
2	12,02	54,64	40,68	349,67	357,48	481,53	26,21
3	12,02	58,09	40,15	378,16	382,25	511,94	25,46
			$\bar{X}$	370,45	377,73	502,2	25,83

**Tablica 4.4. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja mekog čelika na -40 °C**

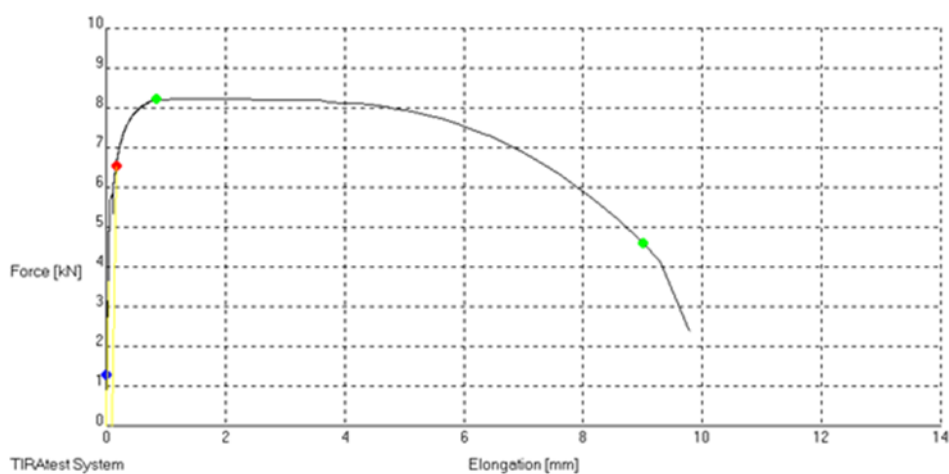
<i>Broj epruvete</i>	<i>d<sub>0</sub>, mm</i>	<i>F<sub>m</sub>, kN</i>	<i>F<sub>k</sub>, kN</i>	<i>R<sub>eL</sub>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>R<sub>eH</sub>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>R<sub>m</sub>, N/mm<sup>2</sup></i>	<i>A, %</i>
1	11,96	58,33	44,59	377,75	392,1	519,21	21,84
2	12,14	58,31	42,1	385,15	408,73	503,77	22,13
3	12,00	55,1	41,3	354,22	380,78	487,2	22,24
			$\bar{X}$	372,37	393,87	503,4	22,07

Tablica 4.5. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja mekog čelika na -100 °C

Broj eprovete	$d_0$ , mm	$F_m$ , kN	$F_k$ , kN	$R_{eL}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{eH}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$A$ , %
1	11,53	56,13	44,18	431,76	445,25	537,55	18,5
2	11,98	55,98	42,08	395,96	408,71	496,65	18,22
3	11,98	59,95	46,71	412,84	423,4	531,81	18,76
			$\bar{X}$	413,52	425,79	522	18,49

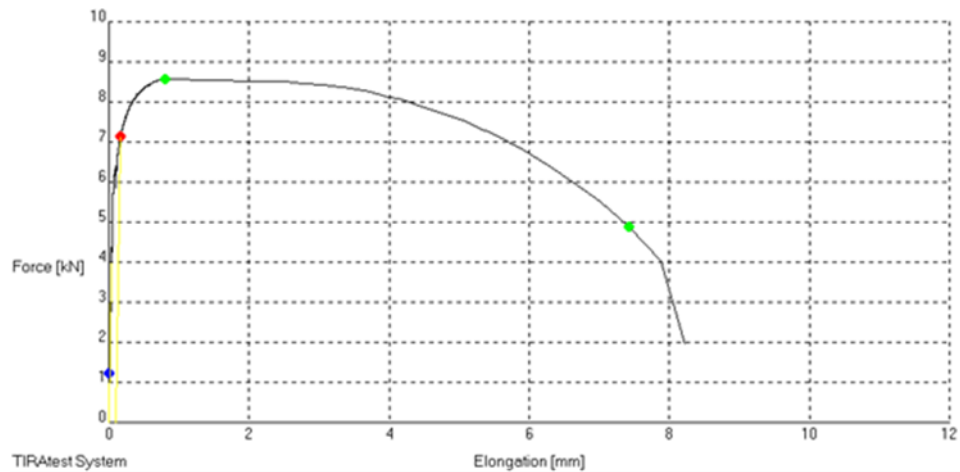
#### 4.4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za aluminija

Rezultati ispitivanja za aluminij dani su kroz tablice ovisno o temperaturi ispitivanja. U tablicama su također određene srednje vrijednosti mehaničkih svojstava koje će se analizirati. Na slici 4.13. dani su dijagrami sila-produljenje dobiveni softverskim paketom TireTest za epruvete 1 aluminija pri sniženim temperaturama.

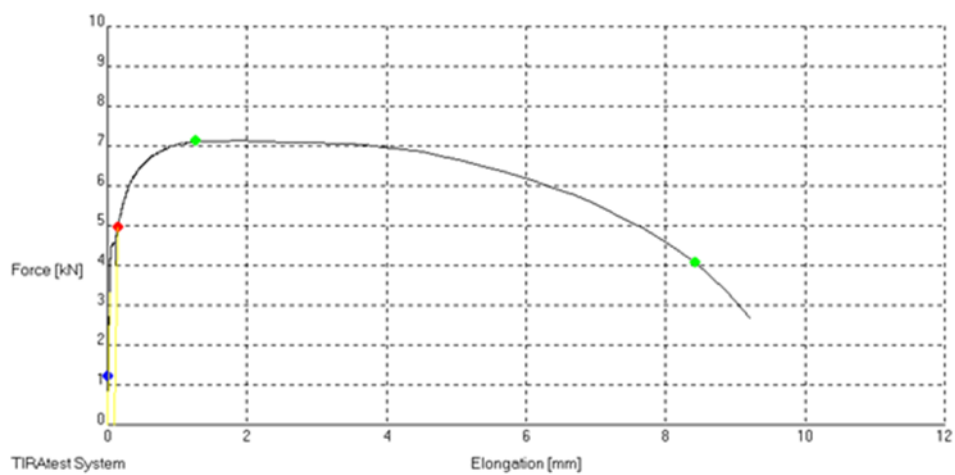


a)

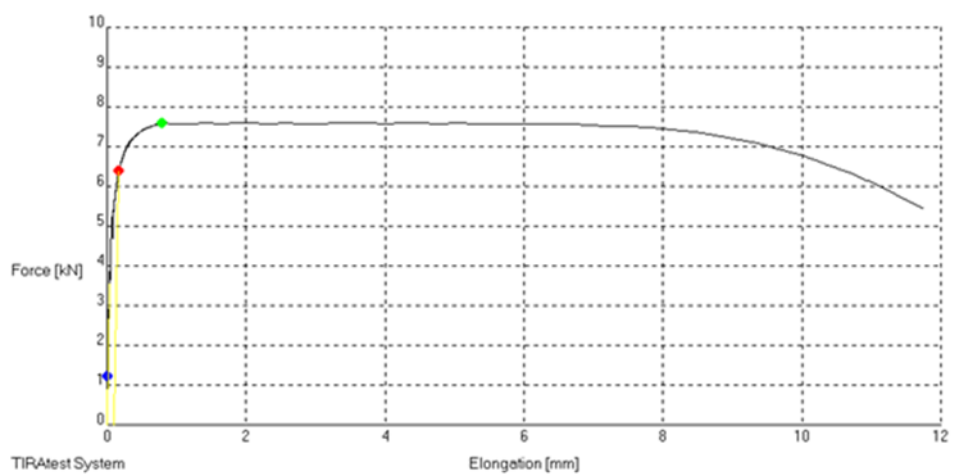




b)



c)



d)

Slika 4.13. Dijagrami sila-produljenje epruveta 1 aluminija

a) sobna temperatura

b) 0 °C

c) -40 °C

d) -100 °C

Tablica 4.6. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja aluminija na sobnoj temperaturi

Broj epruvete	$d_0$ , mm	$F_m$ , kN	$F_k$ , kN	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$A$ , %
1	9,86	8,21	4,6	85,73	107,59	24,81
2	9,79	8,04	4,63	84,22	106,78	24,52
3	9,6	7,57	4,19	79,12	104,59	24,36
			$\bar{X}$	83,02	79,74	24,56

Tablica 4.7. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja aluminija na 0 °C

Broj epruvete	$d_0$ , mm	$F_m$ , kN	$F_k$ , kN	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$A$ , %
1	9,90	8,58	4,88	94,86	113,72	22,06
2	9,89	7,65	4,2	76,35	99,59	21,98
3	9,87	7,87	4,2	93,18	102,85	22,31
			$\bar{X}$	88,13	105,39	22,12

**Tablica 4.8. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja aluminija na -40 °C**

<i>Broj epruvete</i>	$d_0$ , mm	$F_m$ , kN	$F_k$ , kN	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$A$ , %
1	9,92	7,14	4,09	64,17	92,33	18,43
2	9,94	7,17	3,89	69,78	92,41	18,35
3	9,80	7,13	3,75	74,31	94,51	17,92
			$\bar{X}$	69,42	93,1	18,23

**Tablica 4.9. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja aluminija na -100 °C**

<i>Broj epruvete</i>	$d_0$ , mm	$F_m$ , kN	$F_k$ , kN	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$A$ , %
1	9,5	7,6	4	90,18	107,22	12,5
2	9,72	7,92	4,53	82,22	106,74	12,36
3	9,79	8,23	4,69	90,25	109,3	12,78
			$\bar{X}$	87,55	107,72	12,55

## 5. ANALIZA REZULTATA

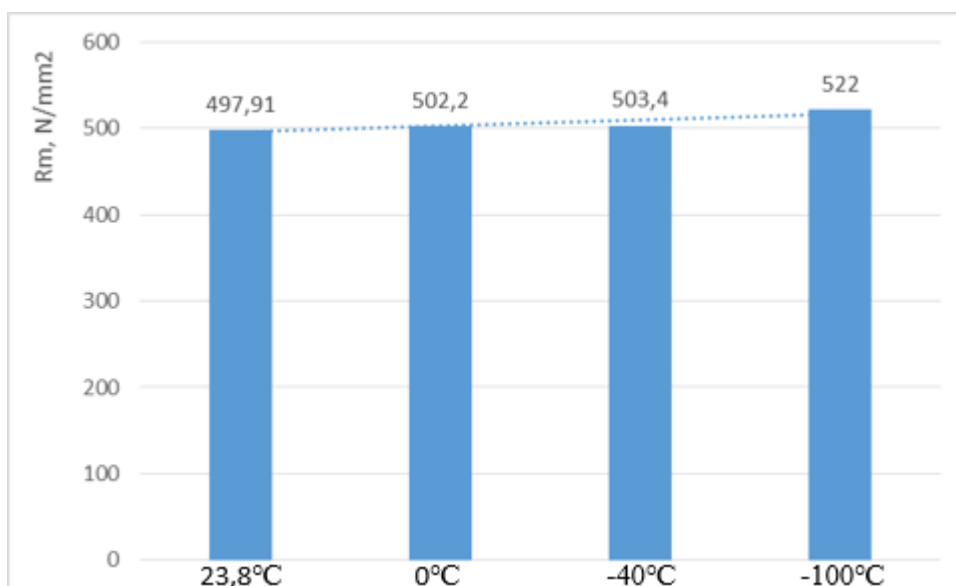
Analiza rezultata provedena je na temelju provedenih ispitivanja. Statičko vlačno ispitivanje metalnih materijala pri radu u eksploatacijskim uvjetima sa sniženim temperaturama od velike je važnosti zbog davanja informacija o mehaničkim svojstvima materijala. Na rezultate ispitivanja utječe veći broj čimbenika. Neki od njih su: uvjeti okoliša, rukovanje (znanje, iskustvo), mjerna oprema (vrsta, tip), ispitni uzorci (obrada, vrsta materijala), obrada podataka (zaokruživanje, interpolacija), software (točnost). Najbitniji utjecaj kod ove vrste ispitivanja je onaj temperature odnosno ohlađivanja epruvete na temperaturu ispitivanja.

Za svaki materijal biti će analizirana vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i istezljivost. Teorijske vrijednosti dobivene iz literature nalažu rast vlačne čvrstoće i granice razvlačenja, te pad istezljivosti. Histogramima će se pokazati trend porasta ili pada analiziranih vrijednosti svojstava na određenim temperaturama ispitivanja. Iscrtkana linija na histogramima predstavlja tendenciju razvoja rezultata.

### 5.1. Meki čelik

Prilikom analize rezultata mekog čelika uspoređivane su vrijednosti vlačne čvrstoće, gornje i donje granice razvlačenja, te istezljivosti u odnosu na snižavanje temperature.

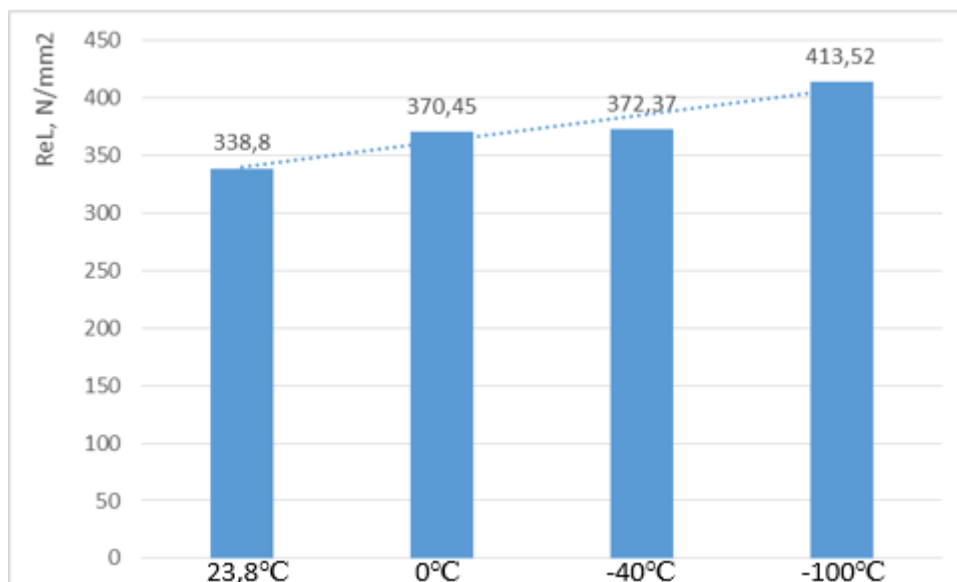
Iz histograma vlačne čvrstoće prikazanog slikom 5.1. mekog čelika možemo zaključiti da prilikom snižavanja temperature vrijednosti vlačne čvrstoće mekog čelika blago rastu.



Slika 5.1. Histogram vlačne čvrstoće mekog čelika

Promjena vlačne čvrstoće mekog čelika sa sobne temperature na 0 °C u postotku iznosi 0,86 %, na -40 °C ona iznosi 1,1 % i na -100 °C iznosi 4,84 %.

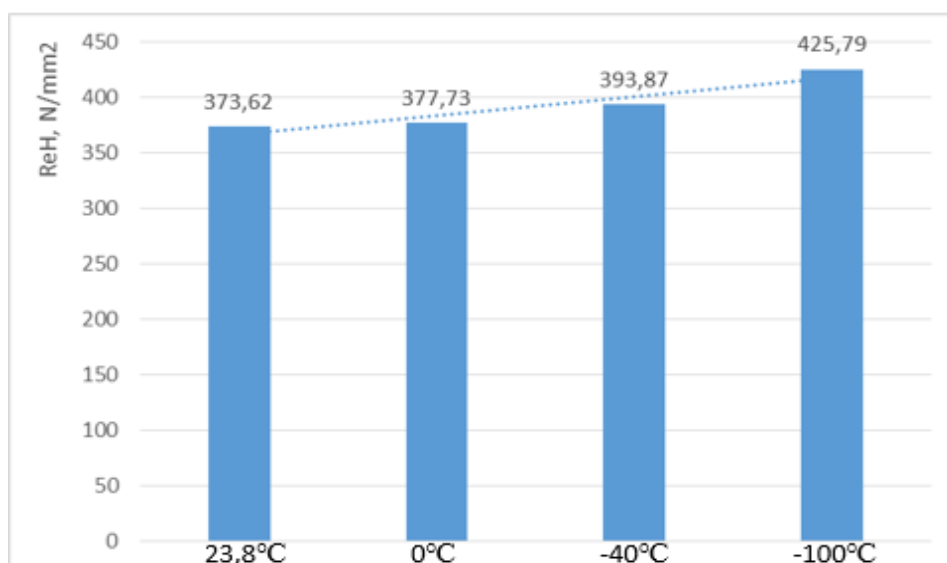
Zaključujući prema dobivenim rezultatima ispitivanja prikazanih slikom 5.2. mekom čeliku rastu vrijednosti donje granice razvlačenja tijekom snižavanja temperature.



**Slika 5.2. Histogram donje granice razvlačenja mekog čelika**

Promjena donje granice razvlačenja mekog čelika sa sobne temperature na 0 °C u postotku iznosi 9,34 %, na -40 °C ona iznosi 9,91 % i na -100 °C iznosi 22,05 %.

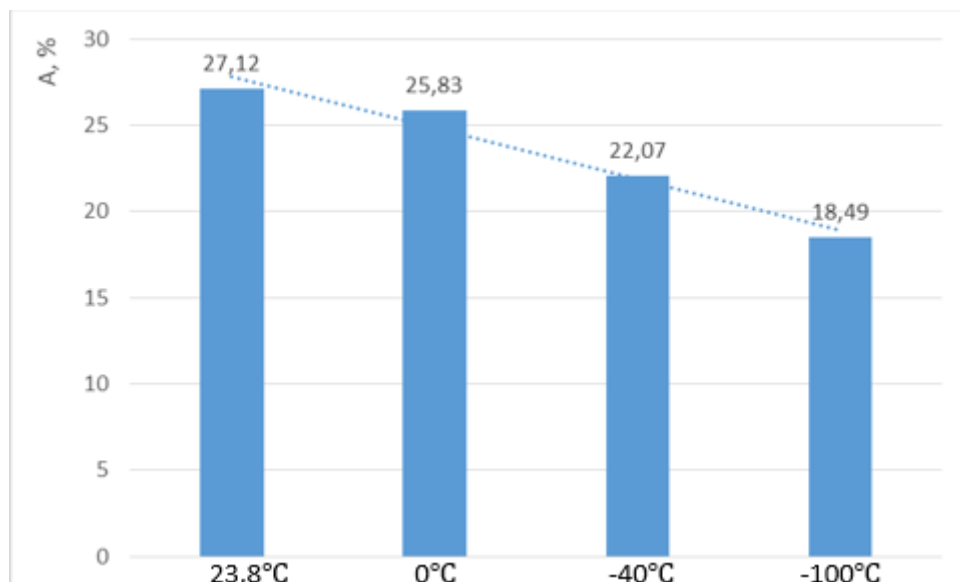
Histogram na slici 5.3. prikazuje gornju granicu razvlačenja mekog čelika, te tendenciju rasta njenih vrijednosti.



**Slika 5.3. Histogram gornje granice razvlačenja mekog čelika**

Promjena gornje granice razvlačenja mekog čelika sa sobne temperature na 0 °C u postotku iznosi 1,1 %, na -40 °C ona iznosi 5,42 % i na -100 °C iznosi 13,96 %.

Iz slike 5.4. zaključujemo da istezljivost mekog čelika na sniženim temperaturama smanjuje svoje vrijednosti što je bilo očekivano prema literaturnim izvorima.



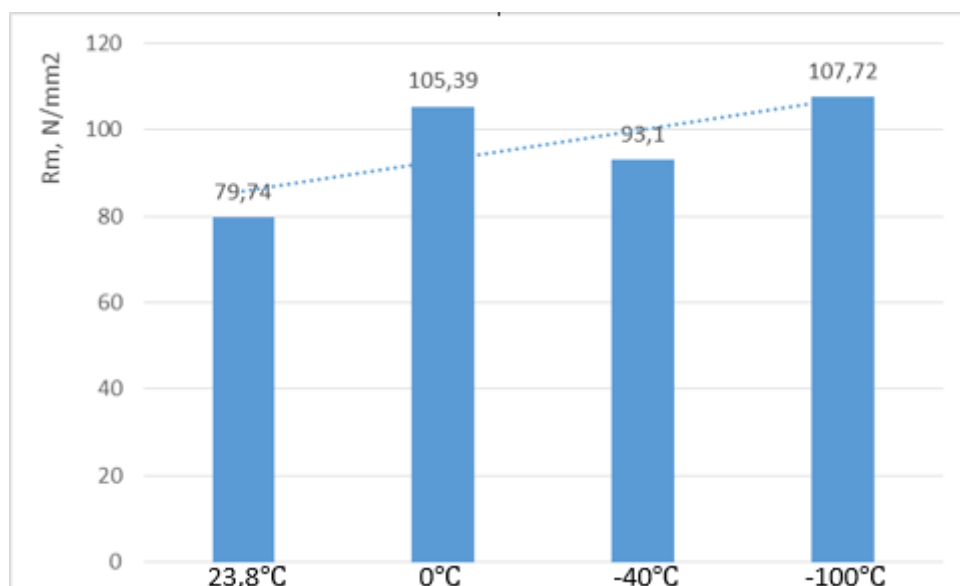
**Slika 5.4. Histogram istezljivosti mekog čelika**

Promjena istezljivosti mekog čelika sa sobne temperature na 0 °C u postotku iznosi 4,76 %, na -40 °C ona iznosi 18,62 % i na -100 °C iznosi 31,82 %.

## 5.2. Aluminij

Analizom rezultata aluminija uspoređivane su vrijednosti vlačne čvrstoće, konvencionalne granice razvlačenja, te istezljivosti u odnosu na snižavanje temperature.

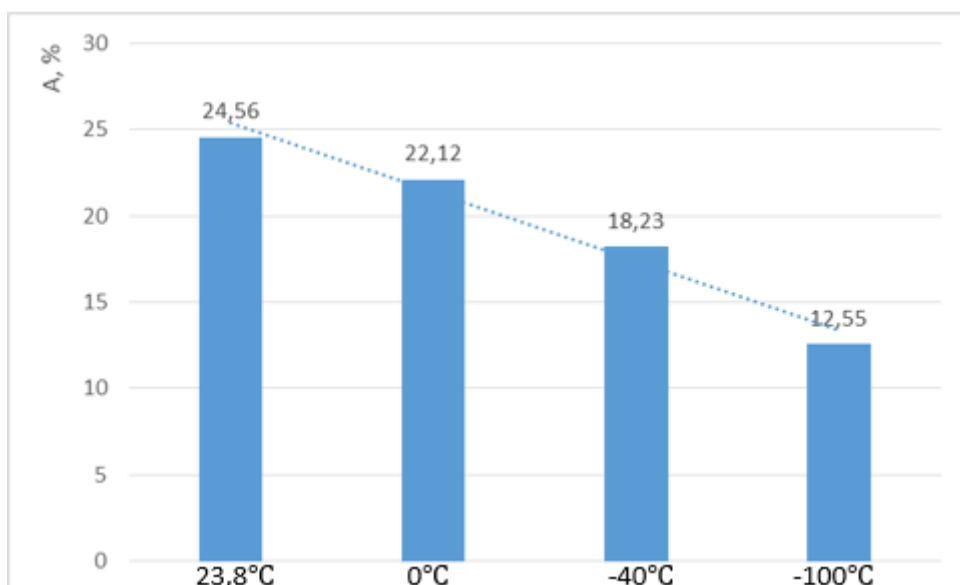
Vlačna čvrstoća aluminija prikazana histogramom na slici 5.5. ima tendenciju rasta prilikom snižavanja temperature, neovisno o rezultatima na -40 °C koje bi mogli zanemariti zbog utjecaja raznih čimbenika od kojih je najvažniji prijenos epruvete iz medija za ohlađivanje u komoru tijekom ispitivanja.



**Slika 5.5. Histogram vlačne čvrstoće aluminija**

Promjena vlačne čvrstoće aluminija sa sobne temperature na 0 °C u postotku iznosi 32,17 %, na -40 °C ona iznosi 16,75 % i na -100 °C iznosi 35,09 %.

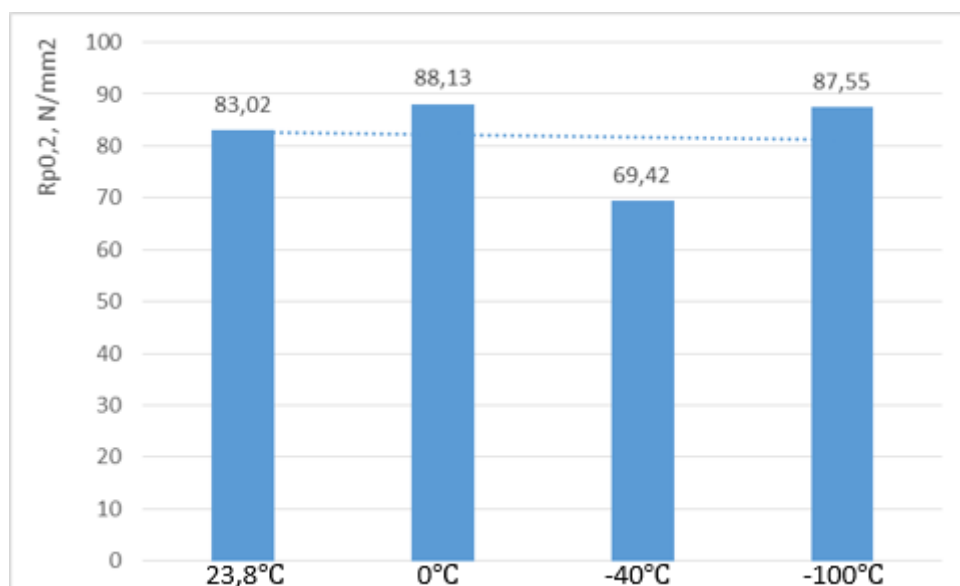
Aluminiju prilikom snižavanja temperature vrlo naglo padaju vrijednosti istezljivosti vidljivo na slici 5.6.



**Slika 5.6. Histogram istezljivosti aluminija**

Promjena istezljivosti aluminija sa sobne temperature na 0 °C u postotku iznosi 9,93 %, na -40 °C ona iznosi 25,77 % i na -100 °C iznosi 48,9 %.

Histogram na slici 5.7. konvencionalne granice razvlačenja aluminija daje nam podatak o blagom snižavanju vrijednosti.



**Slika 5.7. Histogram konvencionalne granice razvlačenja aluminija**

Promjena konvencionalne granice razvlačenja aluminija sa sobne temperature na 0 °C u postotku iznosi 6,15 %, na -40 °C ona iznosi 16,38 % i na -100 °C iznosi 5,46 %.

Problem koji se javlja prilikom određivanja konvencionalne granice razvlačenja kod aluminija je nesigurnost pokazivanja ekstenzometra. Kod nasadnog ekstenzometra kontakti su izrađeni od čelika te je jedan dio ekstenzometra bio u ohlađenoj komori pri nižim temperaturama. S obzirom da nema podataka o utjecaju tih temperaturama na mjerni sustav ekstenzometra ove rezultate mjerenja treba uzeti s dosta velikom dozom rezerve.



## 6. ZAKLJUČAK

Kroz rad je opisana metoda statičkog vlačnog ispitivanja pri sniženim temperaturama. Često su materijali u eksploataciji izloženi radu pri sniženim temperaturama kao što su npr. građevina, naftna industrija i petrokemija, automobilska industrija, itd. Najvažnija primjena je u strojarstvu odnosno znanosti o materijalima. Mehanička svojstva materijala moraju se odrediti sa velikom preciznošću i točnošću zbog odgovornosti koje će nositi u određenim proračunima.

Iz eksperimentalnog dijela rada, dobivenih rezultata ispitivanja, te njihove analize doneseni su sljedeći zaključci:

- Snižena temperatura ima značajan utjecaj na mehanička svojstva metalnih materijala. Iz rezultata ispitivanja vidljivo je da mehanička svojstva mijenjaju svoje vrijednosti snižavanjem temperature. Ako su materijali izloženi eksploatacijskim uvjetima na sniženim temperaturama prilikom dimenzioniranja dijelova ne mogu se koristiti podatci dobiveni statičkim vlačnim ispitivanjem pri sobnoj temperaturi. Potrebno je provoditi statičko vlačno ispitivanje na odgovarajućoj sniženoj temperaturi.
- Mehanička svojstva koja definiraju otpornost materijala za čelik i aluminijske legure (vlačna čvrstoća, gornja i donja granica razvlačenja te konvencionalna granica razvlačenja) povećavaju svoje vrijednosti sa snižavanjem temperature.
- Mehaničko svojstvo koje definira deformabilnost materijala za čelik i aluminijske legure (istežljivost) pri snižavanju temperatura smanjuje svoju vrijednost.
- Ispitivanje mehaničkih svojstava sukladno normi HRN EN ISO 6892-3:2015 je složen proces u kojem ima jako puno utjecajnih faktora koji izazivaju određene nesigurnosti. Neki od značajnijih utjecajnih faktora su:
  - Postizanje i održavanje određene snižene temperature
  - Utjecaj snižene temperature na dodatnu opremu pri mjerenju (ekstenzometar)
  - Izbor prihvatnih naprava za osiguravanje aksijalnosti ispitnih uzoraka pri statičkom vlačnom ispitivanju, itd.

## LITERATURA

- [1] Ivušić V., Franz M., Španiček Đ., Ćurković L. ; „Materijali 1“
- [2] [https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05106G\\_Sample\\_BuyNow.pdf/b4838889-d1dc-4bf5-a8bd-d6771fa36bf8](https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05106G_Sample_BuyNow.pdf/b4838889-d1dc-4bf5-a8bd-d6771fa36bf8)
- [3] Eash D.T. ; „Extensometer for low temperature tensile testing“
- [4] HRN EN ISO 6892-4:2015
- [5] HRN EN ISO 6892-3:2015
- [6] Franz M., Ćorić D. ; „Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala“
- [7] Hurlich A. ; „Low temperature metals“
- [8] <https://www.instron.us/en-us/products/testing-accessories/environmental-chambers-furnaces/environmental-chambers/cooling-modules>
- [9] Podloge za predavanja iz kolegija „Mehanička svojstva materijala“
- [10] Filetin T., Franz M., Španiček Đ., Ivušić V. ; „Svojstva i karakteristike materijala“

## **PRILOZI**

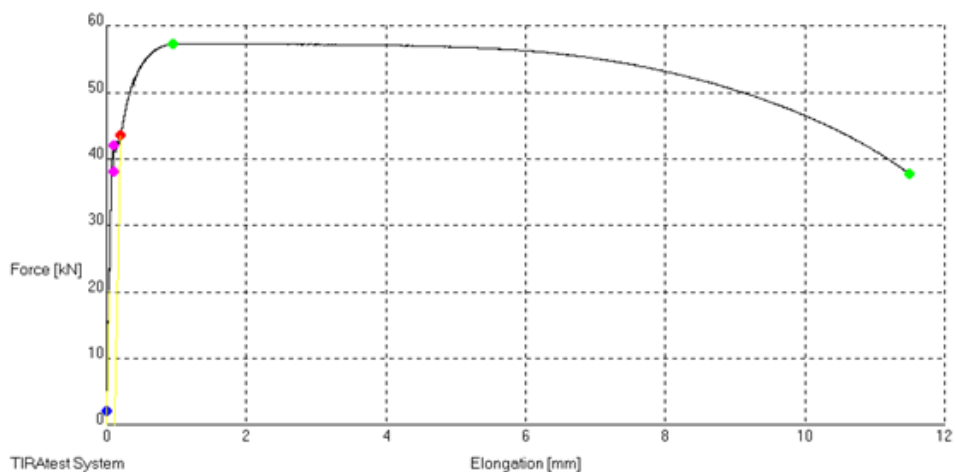
[1] Prilog 1 - Dijagrami sila-produljenje ispitnih uzoraka

[2] CD

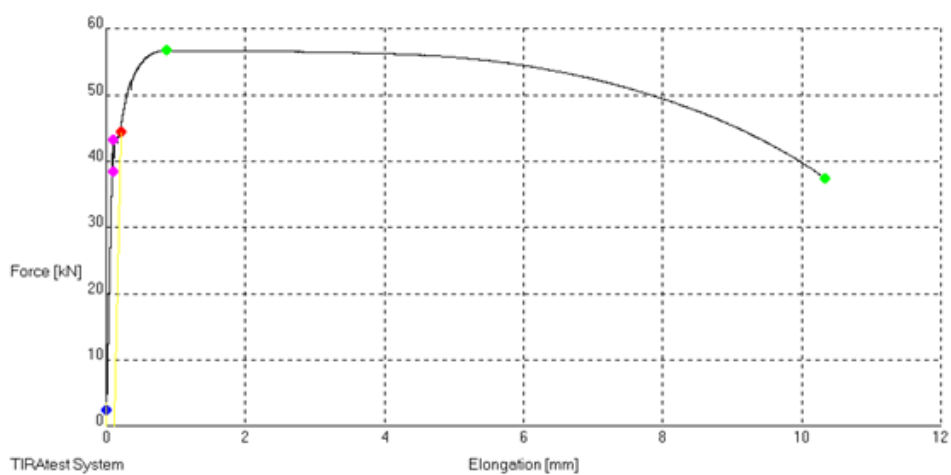
# **Prilog 1 - Dijagrami sila-produljenje ispitnih uzoraka**

## POPIS SLIKA

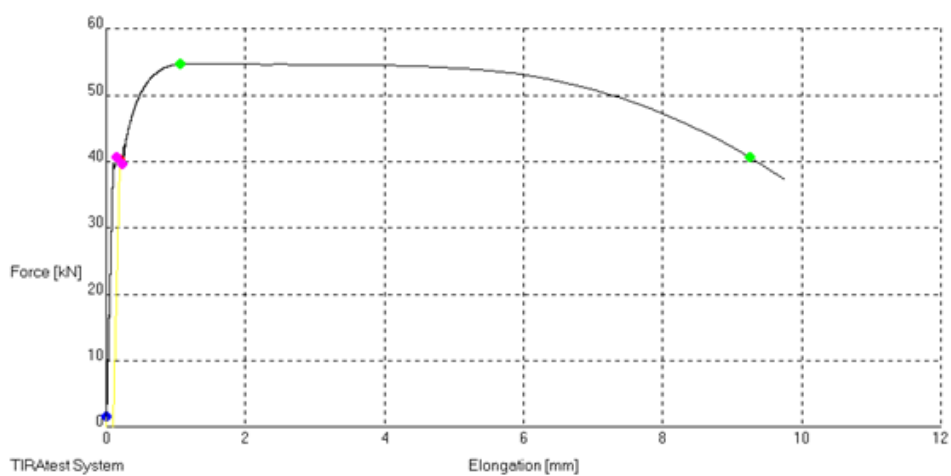
- Slika P1. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 mekog čelika na sobnoj temperaturi  
Slika P2. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 mekog čelika na sobnoj temperaturi  
Slika P3. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 mekog čelika na 0 °C  
Slika P4. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 mekog čelika na 0 °C  
Slika P5. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 mekog čelika na -40 °C  
Slika P6. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 mekog čelika na -40 °C  
Slika P7. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 mekog čelika na -100 °C  
Slika P8. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 mekog čelika na -100 °C  
Slika P9. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 aluminija na sobnoj temperaturi  
Slika P10. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 aluminija na sobnoj temperaturi  
Slika P11. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 aluminija na 0 °C  
Slika P12. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 aluminija na 0 °C  
Slika P13. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 aluminija na -40 °C  
Slika P14. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 aluminija na -40 °C  
Slika P15. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 aluminija na -100 °C  
Slika P16. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 aluminija na -100 °C



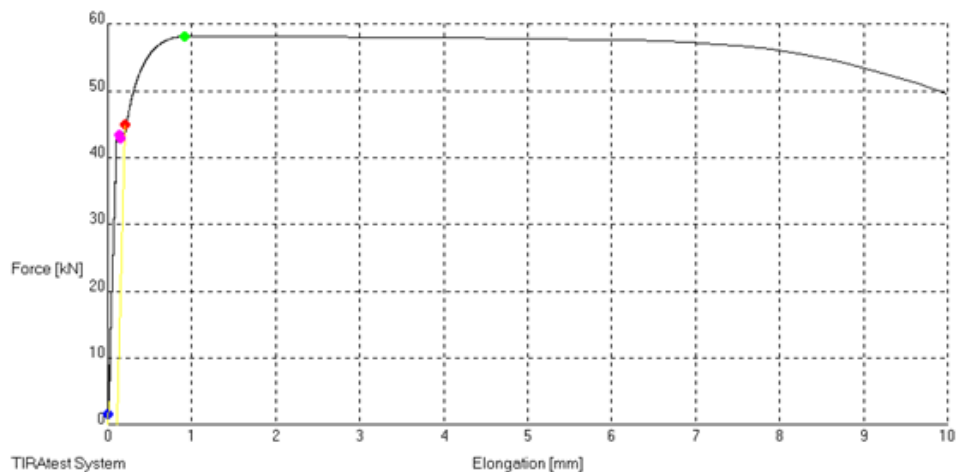
Slika P1. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 mekog čelika na sobnoj temperaturi



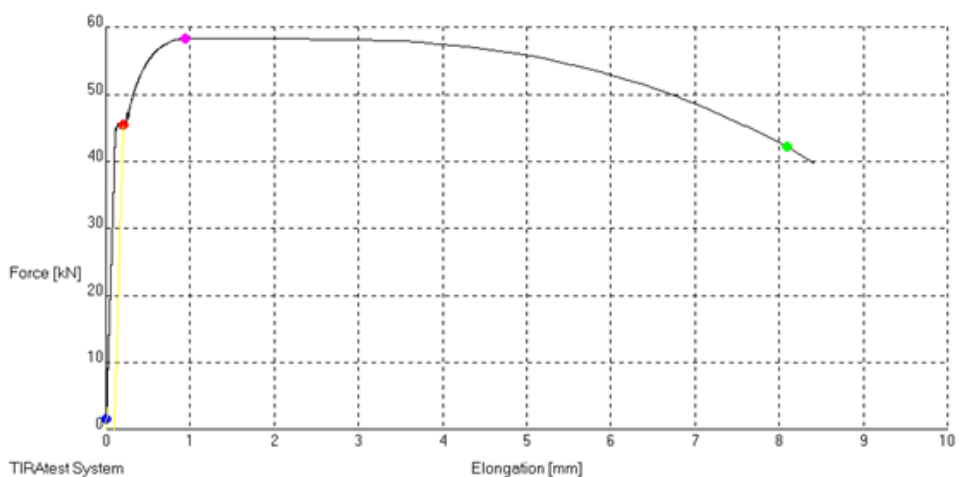
Slika P2. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 mekog čelika na sobnoj temperaturi



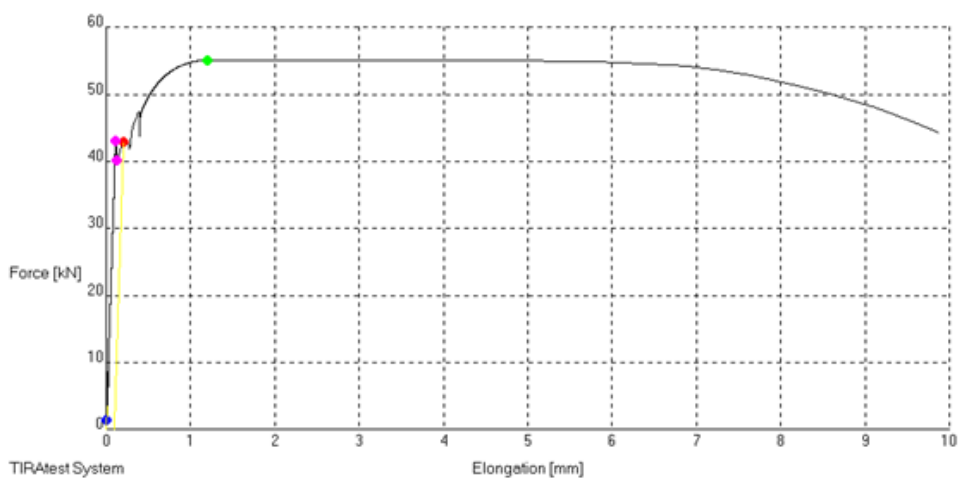
Slika P3. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 mekog čelika na 0 °C



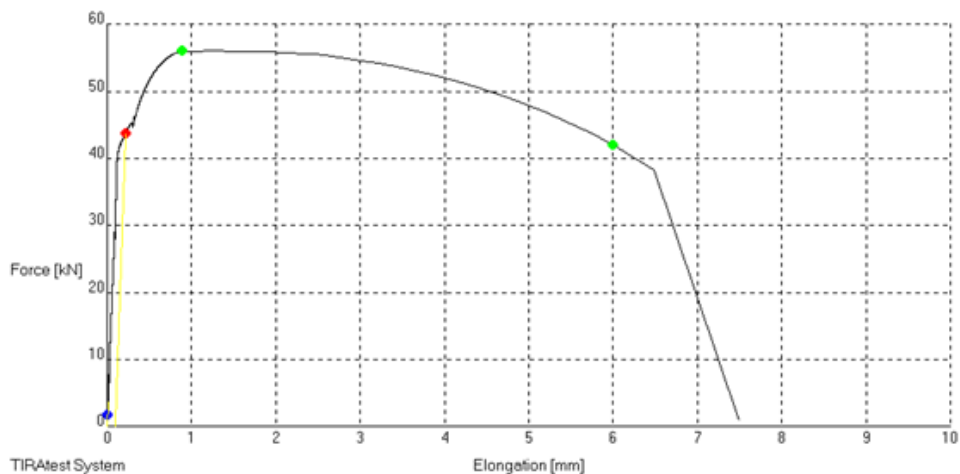
Slika P4. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 mekog čelika na 0 °C



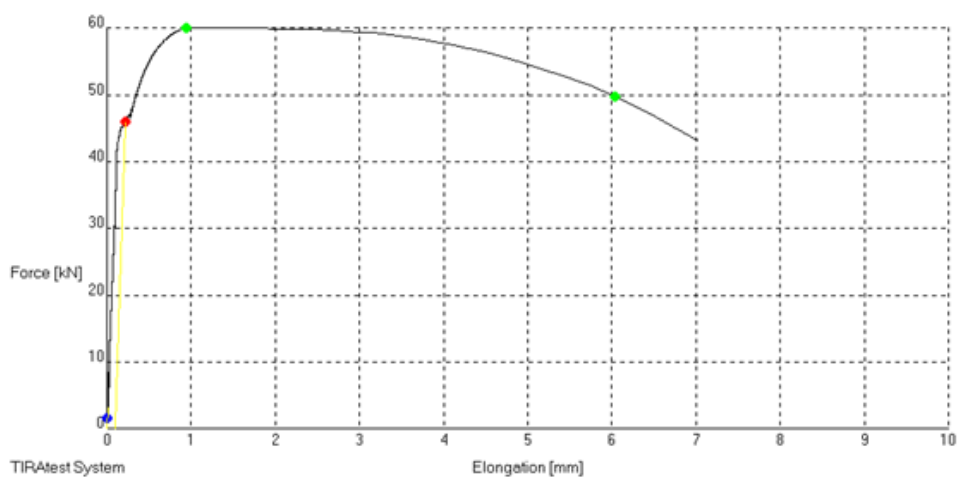
Slika P5. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 mekog čelika na -40 °C



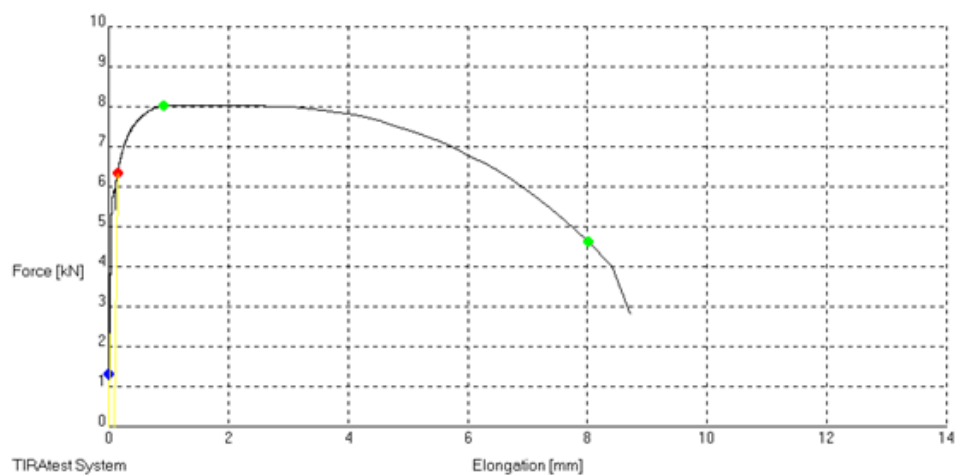
Slika P6. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 mekog čelika na -40 °C



**Slika P7. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 mekog čelika na -100 °C**

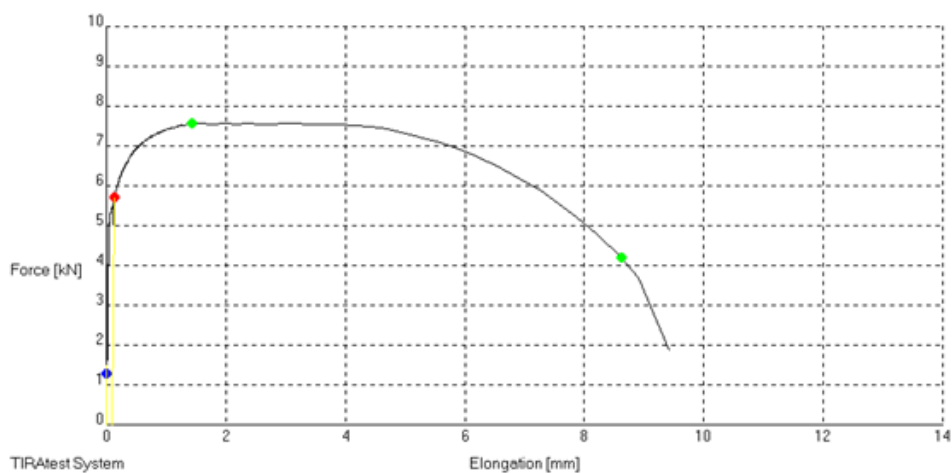


**Slika P8. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 mekog čelika na -100 °C**

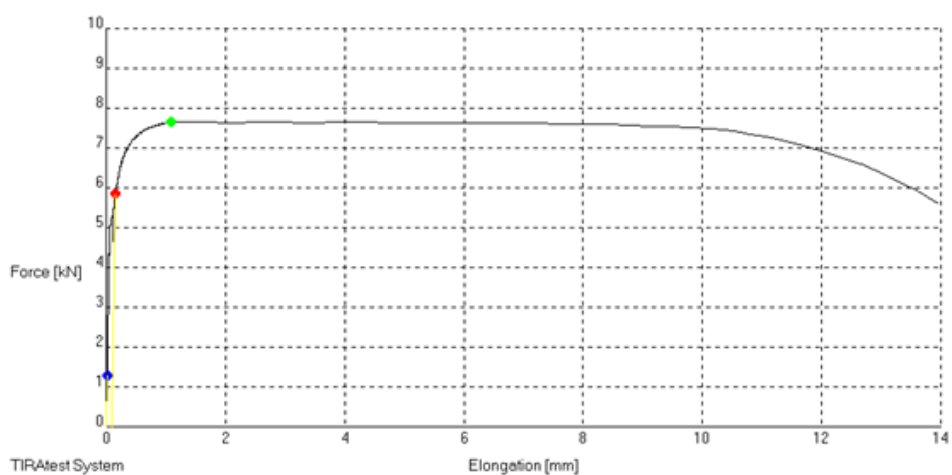


**Slika P9. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 aluminija na sobnoj temperaturi**

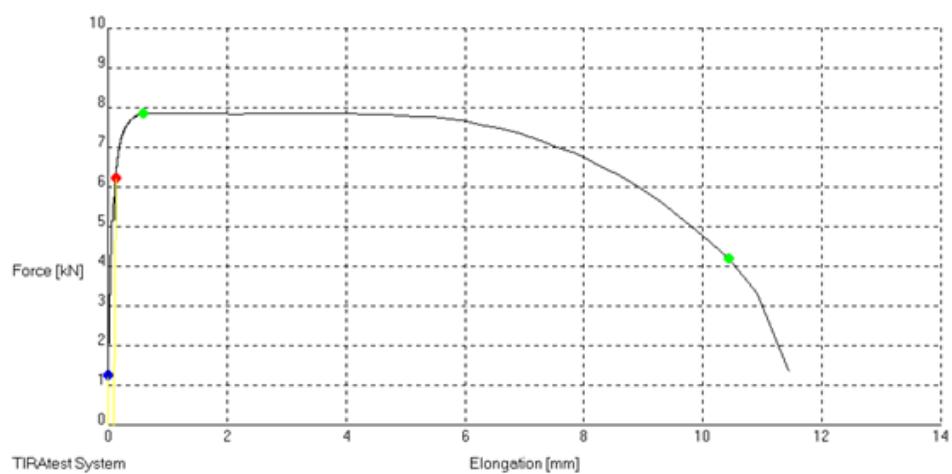




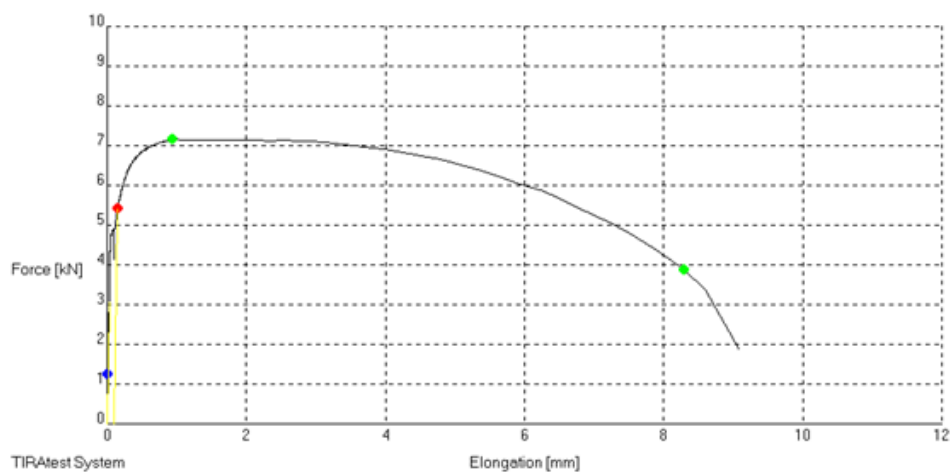
Slika P10. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 aluminija na sobnoj temperaturi



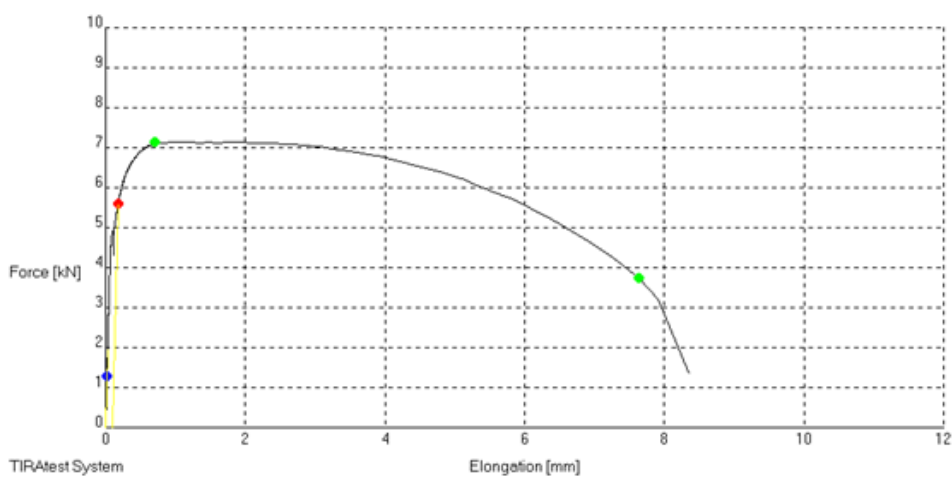
Slika P11. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 aluminija na 0 °C



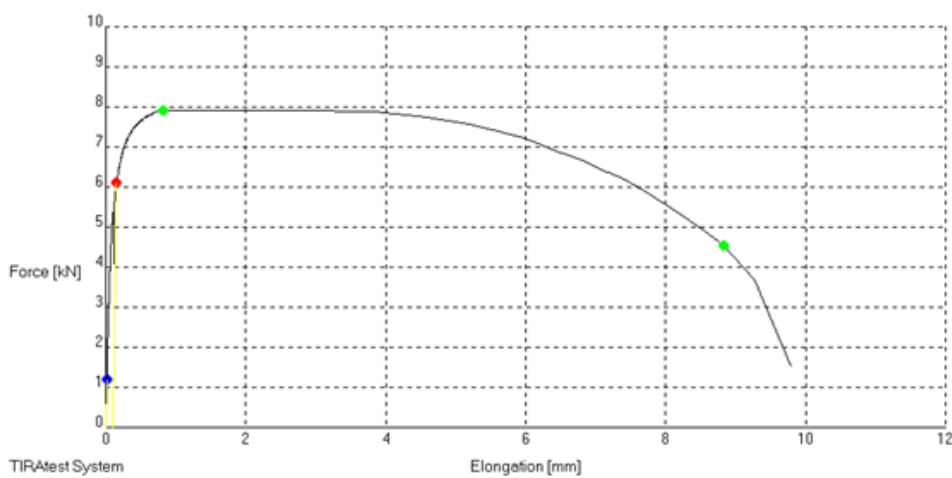
Slika P12. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 aluminija na 0 °C



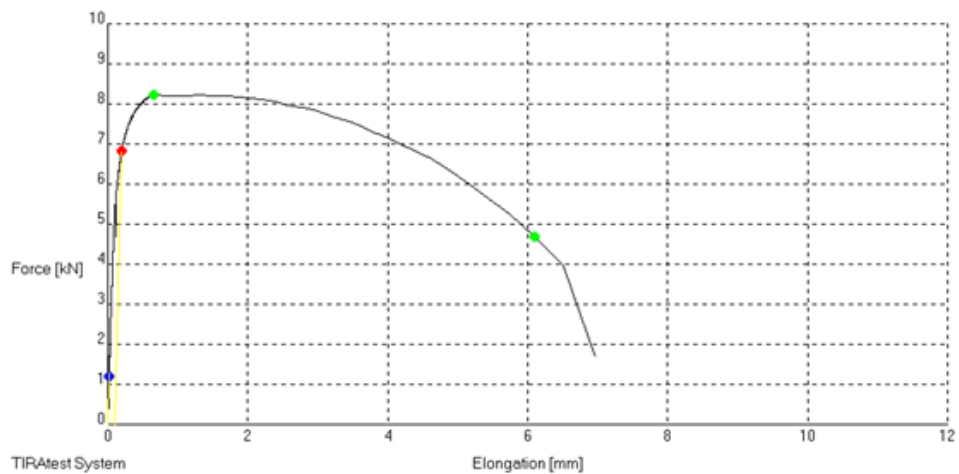
Slika P13. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 aluminija na -40 °C



Slika P14. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 aluminija na -40 °C



Slika P15. Dijagram sila-produljenje epruvete 2 aluminija na -100 °C



**Slika P16. Dijagram sila-produljenje epruvete 3 aluminija na -100 °C**